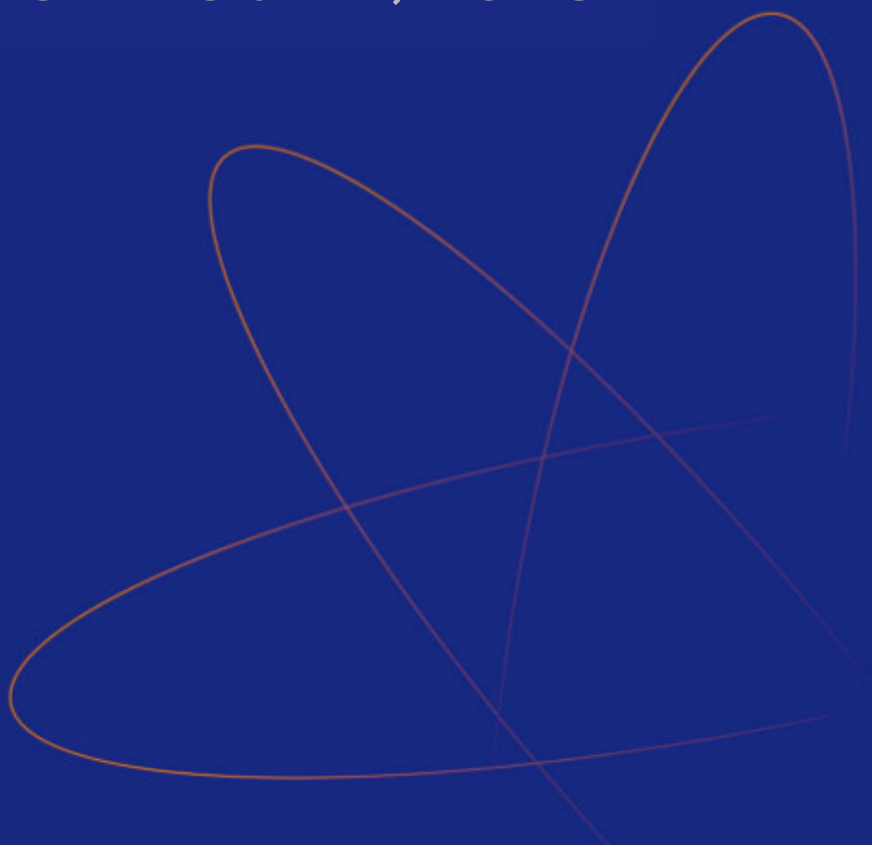


ISSN 1998-426X (print)
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 19 № 2, 2026



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
Сайт: www.radhyg.ru

Журнал распространяется по подписке
Индекс для подписки в агентстве
«Книга-Сервис» - Ф57988
Цена номера – 980 руб.

Формат 60x84/8. Печать офсетная. 19 печ. л.
Выход в свет: 26.06.2026

Тираж 100 экз.
Отпечатано ИП Копыльцов Павел Иванович
394052, Воронежская область, город Воронеж,
улица Маршала Неделина, дом 27, кв. 56

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

Научно-практический журнал

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

Издается ежеквартально.

Журнал включен в перечень российских рецензируемых
научных журналов, в которых должны быть опубликованы
основные научные результаты диссертаций на соискание
ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал индексируется в мультидисциплинарной
библиографической и реферативной базе SCOPUS,
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

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



Том 19 № 2, 2026

Председатель редакционного совета

Онищенко Геннадий Григорьевич — д.м.н., профессор, академик РАН; заместитель президента Российской академии образования, г. Москва, Российская Федерация.

Главный редактор

Романович Иван Константинович — д.м.н., профессор, академик РАН; директор ФБУН «Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Заместитель главного редактора

Вишнякова Надежда Михайловна — д.м.н., доцент; заместитель директора ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора по научной работе, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Редакционный совет

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

Башкетова Наталия Семеновна — руководитель Межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу и Ленинградской области — Главный государственный санитарный врач по городу Санкт-Петербургу и Ленинградской области, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Бузинов Роман Вячеславович — д.м.н., доцент; директор ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Зарединов Дамир Арифович — д.м.н., профессор; главный радиолог Министерства Здравоохранения Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Иванов Виктор Константинович — з.д.н., д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН; заведующий отделом радиационной эпидемиологии и радиологической защиты Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба — филиала ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, г. Обнинск, Российская Федерация.

Марченко Татьяна Андреевна — д.м.н., профессор; главный научный сотрудник ГНЦ РФ ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий), г. Москва, Российская Федерация.

Мирсаидов Улмас Мирсаидович — д.х.н., профессор, академик Академии наук Республики Таджикистан; директор Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, г. Душанбе, Республика Таджикистан.

Попов Валерий Иванович — д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН; заведующий кафедрой гигиены ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Минздрава России, г. Воронеж, Российская Федерация.

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

Рыжкин Сергей Александрович — д.м.н., доцент; заведующий кафедрой радиологии, радиотерапии, радиационной гигиены и радиационной безопасности имени академиков А.С. Павлова и Ф.Г. Кроткова ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, г. Москва, Российская Федерация.

Софронов Генрих Александрович — д.м.н., профессор, академик РАН; научный руководитель ФБУН «Институт экспериментальной медицины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Ушаков Игорь Борисович — д.м.н., профессор, академик РАН; главный научный сотрудник ФГБУ ГНЦ «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, г. Москва, Российская Федерация.

Редакционная коллегия

Алехнович Александр Владимирович — д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН; руководитель Дирекции программы «Научно-образовательный биомедицинский кластер «Трансляционная медицина» ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», г. Москва, Российская Федерация.

Аклеев Александр Васильевич — д.м.н., профессор; директор ФГБУН «Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики» ФМБА России, г. Челябинск, Российская Федерация.

Балтрукова Татьяна Борисовна — д.м.н., профессор; заведующая кафедрой гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Института профилактической медицины ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Водоватов Александр Валерьевич — к.б.н.; заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций ФБУН «Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Горский Григорий Анатольевич — к.м.н.; заместитель директора по инновационной работе ФБУН «Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Гребеньков Сергей Васильевич — д.м.н., профессор; заведующий кафедрой гигиены труда Института профилактической медицины ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Гребенюк Александр Николаевич — д.м.н., профессор; профессор кафедры фармацевтической химии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет» Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Ермолина Елена Павловна — к.м.н., доцент; доцент кафедры радиологии, радиотерапии, радиационной гигиены и радиационной безопасности имени академиков А.С. Павлова и Ф.Г. Кроткова ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, г. Москва, Российская Федерация.

Звонова Ирина Александровна — д.т.н.; главный научный сотрудник ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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

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

Рамзаев Валерий Павлович — к.м.н.; ведущий научный сотрудник ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Репин Виктор Степанович — д.б.н.; руководитель отдела здоровья ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Санжарова Наталья Ивановна — д.б.н., профессор, член-корреспондент РАН; г. Обнинск, Российская Федерация.

Станжевский Андрей Алексеевич — д.м.н.; заместитель директора по научной работе ФГБУ «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова» Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Тахауов Равиль Манирович — д.м.н., профессор; директор ФГБУН «Северский биофизический научный центр» ФМБА России, г. Северск, Российская Федерация.

Шандала Наталья Константиновна — д.м.н., профессор; руководитель Управления радиационной гигиены ФГБУ ГНЦ «Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» ФМБА России, г. 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.

Editorial Secretary
O.O. Pantina
Computer Layout
O.S. Kravtsova

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:

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

The journal is distributed by subscription
Index for subscription in the agency
"Book-Service" - F57988.
The price of an issue - 980 rubles.

Format: 60x84/8.
Offset printing, 19 printed sheets.
Publication date: 26.06.2026
Circulation: 100 copies

Printed by Kopyltsov Pavel Ivanovich IE
394052, Voronezh Region, Voronezh City, Marshala Nedelina
Street, Building 27, Apartment 56

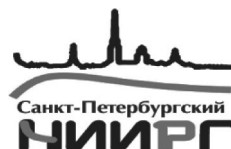
RADIATION HYGIENE

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>)



Vol. 19 № 2, 2026

Chairman of Editorial Council

Gennadiy G. Onishchenko — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; Deputy President of the Russian Academy of Education, Moscow, Russian Federation.

Editor-in-Chief

Ivan K. Romanovich — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; Director of the Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Deputy Editor-in-Chief

Nadezhda M. Vishnyakova — Doctor of Medical Sciences; Deputy Director for Research of the Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Members of Editorial Council

Sergey S. Aleksanin — Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Director of the Federal State Budgetary Institute "The Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine", Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, St. Petersburg, Russian Federation.

Natalia S. Bashketova — Head of the Interregional Office of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing for the city of St. Petersburg and the Leningrad Region — Chief State Sanitary Doctor for the city of St. Petersburg and the Leningrad Region, St. Petersburg, Russian Federation.

Roman V. Buzinov — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor; Director of the Federal Budgetary Scientific Institution "North-West Scientific Center for Hygiene and Public Health", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Damir A. Zaredinov — Doctor of Medical Sciences, Professor; Chief Radiologist of the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan.

Viktor K. Ivanov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Deputy Director for Research of the Radiation-Epidemiology Sector of the A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center, a branch of the P.A. Herzen Federal Medical Research Center of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Obninsk, Russian Federation.

Tatyana A. Marchenko — Doctor of Medical Sciences, Professor; Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal High-Tech Center), Moscow, Russian Federation.

Ulmas M. Mirsaidov — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan; Director of the Agency for Nuclear and Radiation Safety of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan.

Valeriy I. Popov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Head of the Department of Hygiene, N.N. Burdenko Voronezh State Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Voronezh, Russian Federation.

Aleksandr V. Rozhko — Doctor of Medical Sciences; Director of the State Institution "Republican Scientific Center for Radiation Medicine and Human Ecology", Gomel, Republic of Belarus.

Sergey A. Ryzhkin — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor; Head of the Department of Radiology, Radiotherapy, Radiation Hygiene and Radiation Safety named after Academicians A.S. Pavlov and F.G. Krotkov, the Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education "Russian Medical Academy of Continuous Professional Education" of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation.

Genrikh A. Sofronov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; Scientific Director of the Federal Budgetary Scientific Institution "Institute of Experimental Medicine", St. Petersburg, Russian Federation.

Igor B. Ushakov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; Chief Researcher of the Federal State Budgetary Institution State Scientific Center "Federal Medical Biophysical Center after A.I. Burnazyan", the Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russian Federation.

Editorial Board

Aleksandr V. Alekhnovich — Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Head of the Directorate of the Scientific and Educational Biomedical Cluster "Translational Medicine" Program, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia", Moscow, Russian Federation.

Aleksandr V. Akleyev — Doctor of Medical Sciences, Professor; Director of the Federal State Budgetary Institution of Science "Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics", Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russian Federation.

Tatyana B. Baltrukova — Doctor of Medical Sciences, Professor; Head of the Department of Occupational Hygiene and Radiation Hygiene, State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "North-West State Medical University after I.I. Mechnikov", Ministry of Health of the Russian Federation, St. Petersburg, Russian Federation.

Aleksandr V. Vodovotov — Candidate of Biological Sciences; Head of the Laboratory of Radiation Hygiene of Medical Organizations, Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Grigoriy A. Gorsky — Candidate of Medical Sciences; Deputy Director for Innovation Work of the Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Sergey V. Greben'kov — Doctor of Medical Sciences, Professor; Head of the Department of Occupational Medicine, State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "North-West State Medical University after I.I. Mechnikov", Ministry of Health of the Russian Federation, St. Petersburg, Russian Federation.

Aleksandr N. Grebenyuk — Doctor of Medical Sciences, Professor; Professor of the Department of Pharmaceutical Chemistry, State Federal-Funded Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation", St. Petersburg, Russian Federation.

Elena P. Ermolina — Candidate of Medical Sciences; Associate Professor, Department of Radiology, Radiotherapy, Radiation Hygiene and Radiation Safety named after Academicians A.S. Pavlov and F.G. Krotkov, Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education "Russian Medical Academy of Continuous Professional Education" of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation.

Irina A. Zvonova — Doctor of Technical Sciences; Chief Researcher of the Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Marina V. Kaduka — Candidate of Biological Sciences; Head of the Radiochemical Laboratory of the Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Vasily V. Omelchuk — Doctor of Medical Sciences; Scientific Secretary of the Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Valeriy P. Ramzaev — Candidate of Medical Sciences; Leading Researcher, Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Victor S. Repin — Doctor of Biological Sciences; Head of the Health Department of the Federal Budgetary Scientific Institution "St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev", Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russian Federation.

Natalia I. Sanzharova — Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Obninsk, Russian Federation.

Andrey A. Stanzhevsky — Doctor of Medical Sciences; Deputy Director of the Federal Budgetary Scientific Institution "A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies", Ministry of Healthcare of the Russian Federation, St. Petersburg, Russian Federation.

Ravil M. Takhaouov — Doctor of Medical Sciences, Professor; Director of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Seversk Biophysical Research Center", Federal Medical-Biological Agency, Seversk, Russian Federation.

Natalia K. Shandala — Doctor of Medical Sciences, Professor; Head of the Department of Radiation Hygiene of the Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Medical Biophysical Center after A.I. Burnazyan", Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russian Federation.

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Кравцова О.С., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я.,
Жеско Т.В., Романович И.К.

**Дозовые оценки внутреннего облучения жителей
населенных пунктов Брянской области
по результатам обследований 2019–2022 гг. 7**

Попова А.А., Чипига Л.А., Майстренко Д.Н., Евтушенко В.И.,
Станжевский А.А., Николаев Д.Н., Понежа Т.Е.,
Виноградова Ю.Н., Иоффе Е.Б., Майстренко А.Д.

**Оценка радиопротекторной эффективности
водорастворимой натриевой соли n-ацетилцистеина
в экспериментальных
исследованиях 18**

Киселев О.С., Блинова Е.А., Аклейев А.В.

**Влияние метилирования и транскрипционной
активности генов редокс-системы на клеточную
гибель лимфоцитов крови у хронически
облучённых лиц 27**

Водоватов А.В., Косарлукова Е.А., Костина К.Е., Репин Л.В.,
Горский Г.А., Лихун Д.А.

**Дозы облучения пациентов при проведении
цифровой маммографии в Санкт-Петербурге
и Ленинградской области 34**

Микрюкова Л.Д., Завьялов Д.А.

**Риск смерти от злокачественных новообразований
органов верхнего отдела желудочно-кишечного
тракта в Уральской когорте аварийно-облученного
населения 43**

Арефьева Д.В., Грабский Ю.В., Балтрукова Т.Б., Петушок А.В.

**Радиационная обстановка на рабочих местах
персонала при обращении с радиоактивными
отходами на предприятиях атомного
судостроения и судоремонта 53**

Дружинина П.С., Шацкий И.Г., Чипига Л.А., Бажин С.Ю.,
Шлеенкова Е.Н., Алексеева Д.В., Волок О.И.

**Поглощенные дозы в органах при компьютерной
томографии с применением средств индивидуальной
радиационной защиты на примере фантома
пятилетнего ребенка 63**

ОБЗОРЫ

Шарагин П.А., Ахмадуллин Р.М., Толстых Е.И., Шишкина Е.А.

**Определение морфометрических характеристик
костного мозга и кости с целью создания
дозиметрической модели высокого разрешения 75**

Мирсаидов У., Назаров Х.М., Мирсаидзода И.,
Саидзода В.Я., Азизов О.А.

**Радиоэкологические аспекты управления
хвостохранилищами урановой промышленности
Таджикистана 84**

Репин Л.В., Библин А.М., Водоватов А.В., Ахматдинов Р.Р.

**Применение различных показателей
радиационного риска для здоровья
при медицинском облучении 95**

Водоватов А.В., Библин А.М., Капырина Ю.Н., Гусева Р.А.,
Пузырев В.Г., Иمامов А.А.

**Сравнительный анализ информированности
о радиационной безопасности студентов
медицинских вузов и врачей 107**

RESEARCH ARTICLES

Kravtsova O.S., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Bruk G.Ya.,
Zhesko T.V., Romanovich I.K.

**Dose assessments of internal exposure for residents
of populated areas of the Bryansk region
according to the 2019–2022 survey 15**

Popova A.A., Chipiga L.A., Maystrenko D.N., Evtushenko V.I.,
Stanzhevskiy A.A., Nikolaev D.N., Ponezha T.E.,
Vinogradova Yu.N., Ioffe E.B., Maistrenko A.D.

**Evaluation of the radioprotective efficacy
of water soluble sodium salt of n-acetylcysteine
in experimental studies 25**

Kiselev O.S., Blinova E.A., Akleyev A.V.

**Association of methylation and transcriptional
activity of redox system genes with apoptosis
and necrosis of lymphocytes in chronically
irradiated individuals 32**

Vodovатов A.V., Kosarlukova E.A., Kostina K.E., Repin L.V.,
Gorsky G.A., Likhun D.A.

**Radiation doses for patients undergoing
digital mammography in Saint Petersburg
and Leningrad Region 41**

Mikryukova L.D., Zavyalov D.A.

**Mortality risk due to upper gastrointestinal cancers
in Southern Urals population exposed
to radiation cohort 51**

Arefieva D.V., Grabsky Yu.V., Baltrukova T.B., Petushok A.V.

**Radiation situation at workplaces of personnel
during radioactive waste management
at nuclear shipbuilding and ship repair
enterprises 61**

Druzhinina P.S., Shatsky I.G., Chipiga L.A., Bazhin S.Yu.,
Shleenkova E.N., D.V. Alekseeva, Volok O.I.

**Absorbed organ doses in computed tomography using
personal radiation protective equipment:
a phantom study of a five-year-old child 73**

REVIEWS

Sharagin P.A., Akhmadullin R.M., Tolstykh E.I., Shishkina E.A.

**Determination of morphometric characteristics
of bone marrow and bone in order to create
a high-resolution dosimetric model 81**

Mirsaidov U., Nazarov Kh.M., Salomov Dzh.A., Saidzoda V.Ya.,
Azizov O.A.

**Radioecological aspects of the management
of uranium industry tailings in Tajikistan 92**

Repin L.V., Biblin A.M., Vodovатов A.V., Akhmatdinov R.R.

**Application of different radiation health risk
metrics in medical exposure 104**

Vodovатов A.V., Biblin A.M., Kapryina Yu.N., Guseva R.A.,
Puzirev V.G., Imamov A.A.

**Comparative analysis of radiation protection
awareness among medical students
and practicing physicians 112**

СОДЕРЖАНИЕ

Том 19 № 2, 2026

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Гурьев Н.Е., Зонова Е.О.

Пространственное распределение плотности потока радона с поверхности грунта на территории города Тюмени и его окрестностей 115

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

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

Радиационный контроль на предприятиях нефтегазовой отрасли 124

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Калинина М.В., Наматян Т.Б., Ковалев Е.В., Жукова Т.В., Мусиенко С.А., Наматян А.Б.

Динамика медицинского облучения населения Ростовской области за период 2019–2024 гг. 131

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

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

Современные подходы к определению содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды и биологических тканях 140

ЮБИЛЕИ

**Ирина Александровна Звонова:
к юбилейной дате 145**

**Виктор Степанович Репин:
к 80-летию юбилею 146**

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 147

CONTENTS

Vol. 19 № 2, 2026

RADIATION MEASUREMENTS

Guryev N.E., Zonova E.O.

Spatial distribution of radon flux density from subsoil surface on the territory of Tyumen and its surroundings 122

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

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

Radiation control at oil and gas industry enterprises 129

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

Kalinina M.V., Namatyan T.B., Kovalev E.V., Zhukova T.V., Musienko S.A., Namatyan A.B.

Dynamics of medical exposure of the population of the Rostov region for the period 2019–2024 138

BRIEF REPORTS

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

Modern approaches to the determination of organically bound tritium in environmental media and biological tissues 143

ANNIVERSARIES

**Irina Alexandrovna Zvonova:
In Celebration of a Jubilee Date 145**

**Victor Stepanovich Repin:
In Celebration of His 80th Jubilee 146**

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 147

Дозовые оценки внутреннего облучения жителей населенных пунктов Брянской области по результатам обследований 2019–2022 гг.

Кравцова О.С., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я., Жеско Т.В., Романович И.К.

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

В статье приведены результаты оценки доз внутреннего облучения населения по итогам радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области в 2019–2022 гг. Цель исследования – выполнить дозиметрические расчеты по разным моделям и определить модельные параметры, подлежащие актуализации. Материалы и методы: Расчеты выполнены для разных возрастных групп населения обследованных населенных пунктов Брянской области, а также для критической группы населения в соответствии с действующими методическими документами. Для дозовых оценок использованы результаты комплексных радиационно-гигиенических обследований населенных пунктов и данные радиационного мониторинга. Результаты исследования и обсуждение: Наибольшие отклонения от модели по поступлению ^{137}Cs с пищевыми продуктами (охватывающей большинство местных пищевых продуктов и их потребление населением) получены для модели, в качестве параметров которой используются коэффициенты перехода радионуклида из почвы в пищевые продукты (молоко и грибы) для взрослого населения, проживающего на территориях с высокими уровнями загрязнения почвы (более 555 кБк/м² по ^{137}Cs). При этом для населения остальных территорий (большинство обследованных населенных пунктов) сходимость результатов дозовых оценок удовлетворительная. Заключение: Средние годовые эффективные дозы внутреннего облучения населения обследованных населенных пунктов в целом не превышают 1 мЗв, дозы внутреннего облучения критической группы жителей – 5 мЗв. Пищевые продукты природного происхождения дают больший вклад в дозу внутреннего облучения в сравнении с сельскохозяйственными пищевыми продуктами. Методология оценки доз внутреннего облучения населения чернобыльских территорий показала свою устойчивость в базисных подходах. Модификация ряда модельных параметров позволила сблизить результаты расчетов, выполненных по разным моделям.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, население, дозы внутреннего облучения, цезий-137.

Введение

В системе радиационной защиты населения дозовый критерий имеет основополагающее значение. Информация о дозах облучения населения, проживающего в условиях радиоактивного загрязнения окружающей среды, необходима для контроля уровней радиационного воздействия на его здоровье, важна для обоснования проведения реабилитационных мероприятий, востребована при формировании (и изменении) стратегии возврата населения пострадавших территорий к нормальной жизнедеятельности [1]. Систематическая оценка доз облучения населения позволяет проследить тенденцию изменения радиационной обстановки и дать прогноз ее развития в будущем.

Дозовые оценки для населения территорий Российской Федерации (РФ), подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), выполняются с первых дней аварии [2, 3]. В зависимости от радиационной обстановки на том или ином этапе аварии, прева

лируются подходы к оценке доз облучения населения изменялись и развивались [3].

Периодически методы дозиметрических расчетов следует пересматривать с целью актуализации их параметров. Совершенствование методик оценки доз внутреннего облучения проводится путем постоянного сбора данных о содержании радионуклидов в основных видах пищевых продуктов местного происхождения с последующим анализом динамики их изменения. С течением времени меняются модели поведения населения, в т.ч. предпочтения в потреблении пищевых продуктов местного происхождения. Также с течением времени происходят изменения в экосистемах, что может повлиять на распределение радионуклидов в объектах окружающей среды. Отслеживание актуальной радиологической информации, а также научный анализ собранных данных по параметрам радиационной обстановки на загрязненных территориях позволяют уточнить модельные параметры расчета доз облучения населения, скорректировать методические подходы.

С 1991 года постоянным критерием радиационной безопасности населения чернобыльских территорий был определен предел годовой дозы облучения [4]. Годовые дозы

Кравцова Ольга 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: olga.s.kravtsova@mail.ru

внутреннего облучения населения и его наиболее облучаемых представителей – критической группы – оценивали по результатам мониторинга объектов окружающей среды и пищевых продуктов расчетным путем и подтверждали результатами измерений на спектрометрах (счетчиках) излучения человека (СИЧ). Такая практика используется и в настоящее время. Ввиду значительной пятнистости радиоактивного загрязнения территорий, дозы облучения принято оценивать для жителей отдельных населенных пунктов (НП), поскольку в пределах НП (и в пределах его ареала) загрязнение относительно равномерно [4].

Собранные в период 2019–2022 гг. данные текущего радиационного мониторинга и результаты комплексных радиационно-гигиенических обследований НП юго-западных территорий Брянской области, представленные в публикациях [5–9], позволили выполнить расчеты средних годовых эффективных доз (СГЭД) внутреннего облучения населения и сопоставить между собой результаты различных методов оценки.

Цель исследования – выполнить оценку текущих (годовых) доз внутреннего облучения жителей НП Брянской области, обследованных в 2019–2022 гг., и определить параметры дозиметрических моделей, подлежащие актуализации.

Материалы и методы

В системе радиационной защиты населения РФ модели оценки доз внутреннего облучения населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС, базируются на двух подходах: по поступлению радионуклидов в организм жителей с пищевыми продуктами и по содержанию ^{137}Cs в организме человека [10]. Алгоритм расчета СГЭД внутреннего облучения населения НП и его критической группы приведены в методических указаниях МУ 2.6.1.2003-05¹ и МУ 2.6.1.3152-13², алгоритм расчета СГЭД облучения детского населения – в методических рекомендациях МР 2.6.1.0007-10³. Алгоритмы расчета СГЭД облучения населения НП также изложены в методических рекомендациях по обеспечению радиационной безопасности «Радиационный мониторинг доз облучения населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС»⁴.

Результаты исследований содержания радионуклидов (^{137}Cs и ^{90}Sr) в пищевых продуктах местного происхождения за период с 2019 по 2022 год приводятся в публикациях [7, 8], уровни содержания ^{137}Cs в организме жителей, измеренные

в этот же период времени, – в публикации [9], оценки уровней потребления тех или иных местных пищевых продуктов рассмотрены в публикации [6], типы обследованных НП и их демографические характеристики – в публикации [5].

Данные о плотности загрязнения НП предоставлены Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

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

Результаты и обсуждение

Исследования структуры рационов питания населения, изучение современных уровней содержания радионуклидов в пищевых продуктах местного происхождения позволили выполнить расчеты СГЭД внутреннего облучения жителей обследованных НП по модели поступления радионуклидов в организм человека с пищевыми продуктами [11]. Алгоритм расчета по этой модели в качестве исходных данных предполагает информацию об удельной активности радионуклидов в пищевых продуктах и объемы их годового потребления. Для оценки доз внутреннего облучения с использованием модели по поступлению радионуклидов с пищевыми продуктами (далее – модель по поступлению, модель «ПП») были использованы данные по следующим пищевым продуктам: из сельскохозяйственных – свинина, говядина, молоко коровье, молоко козье, творог, мясо птицы домашней, мясо прочих сельскохозяйственных животных (баранина, крольчатина, мяса козы), картофель, овощи, овощная зелень, яйцо куриное; из продуктов природного происхождения – грибы, ягоды лесные, рыба местных водоемов, мясо диких животных. Дополнительно в модели использованы коэффициенты снижения содержания радионуклидов в готовом пищевом продукте вследствие их кулинарной обработки. Численные значения этих коэффициентов были взяты из публикации [12], а также из методических документов, разработанных применительно к ситуации радиоактивного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, перечисленных в разделе выше. Дозовые коэффициенты для расчета эффективной дозы облучения, обусловленной поступлением радионуклидов пероральным путем, были использованы в соответствии с публикацией 72 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [13].

Оценка доз внутреннего облучения жителей исследо-

¹Методические указания МУ 2.6.1.2003-05 «Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей на селенных пунктах Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». М., 2005. 16 с. [Methodological guidelines. The assessment of critical population groups average annual effective exposure doses in radioactively contaminated Russian Federation settlements after Chernobyl NPP accident (MU 2.6.1.2003-05), Moscow, 2005, 16 p. (In Russ.)]

²Методические указания МУ 2.6.1.3152-13 «Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей на селенных пунктах Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». Изм. 1 к МУ 2.6.1.2003-05. М., 2014. 7 с. [Methodological guidelines. The assessment of critical population groups average annual effective exposure doses in radioactively contaminated Russian Federation settlements after Chernobyl NPP accident (MU 2.6.1.3152-13). Changes to methodological guidelines 2.6.1.2003-05, Moscow, 2014, 7 p. (In Russ.)]

³Методические рекомендации МР 2.6.1.0007-10. Оценка доз облучения детей, проживающих на территориях, радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 27 с. [Methodological guidelines MR 2.6.1.0007-10. Assessment of exposure doses to children living in areas with radioactive contamination due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Methodical guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor; 2011. 27 p. (In Russ.)]

⁴Методические рекомендации по обеспечению радиационной безопасности «Радиационный мониторинг доз облучения населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС» // Радиационная гигиена, 2008. Т. 1, № 2. С. 72–96. [Methodical guidelines "Radiation monitoring of exposure doses to the public of the radioactive contaminated territories due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant" // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2008; 1(2): 72–96. (In Russ.)]

ванных территорий по содержанию ^{137}Cs в основных дозообразующих пищевых продуктах и их эффективному потреблению (далее – модель «ЭП») была выполнена согласно методическим документам МУ 2.6.1.2003-05, МУ 2.6.1.3152-13 и МР 2.6.1.0007-10.

Оценка доз внутреннего облучения взрослых жителей по содержанию ^{137}Cs в основных дозообразующих пищевых продуктах, рассчитанная через коэффициенты перехода (КП) ^{137}Cs из почвы в пищевой продукт (далее – модель «КП»), была выполнена по методическим документам МУ 2.6.1.2003-05, МУ 2.6.1.3152-13.

Оценка доз внутреннего облучения по модели, в качестве исходных данных которой используются результаты СИЧ-измерений (далее – модель «СИЧ»), была выполнена в соответствии с методическими документами МУ 2.6.1.2003-05, МР 2.6.1.0007-10.

Результаты дозовых расчетов по вышеописанным моделям представлены в таблице 1 для разных возрастных групп

населения. В таблице приведен диапазон значений доз внутреннего облучения населения НП с различными уровнями загрязнения почвы ^{137}Cs .

Из анализа данных таблицы 1 можно заключить, что дозы облучения, оцененные по поступлению ^{137}Cs с местными пищевыми продуктами (модель «ПП») и по содержанию ^{137}Cs в основных дозообразующих продуктах и их эффективному потреблению (модель «ЭП»), довольно близки и это характерно для всех возрастных категорий жителей НП, находящихся в различных границах загрязненности почвы ^{137}Cs . Наибольшие отклонения от модели «ПП» (охватывающей большинство местных пищевых продуктов и их потребление населением) получены для СГЭД, оцененных по КП, для жителей НП с высокими уровнями радиоактивного загрязнения почвы (более 555 кБк/м^2 по ^{137}Cs). Дозы, оцененные по СИЧ-измерениям для взрослых жителей и подростков, могут отличаться до 2-3 раз в меньшую сторону от оцененных значений по поступлению ^{137}Cs с пищевыми продуктами («ПП» и «ЭП» модели).

Таблица 1. СГЭД внутреннего облучения населения (E^{int}), мЗв
[Table 1. Average annual effective dose of internal exposure (E^{int}), mSv]

Модель * [Model]	взрослые [adults]	подростки [teenagers]	школьники [schoolchildr.]	дошк. орг. [presch. org.] **	дошк. неорг. [presch. unorg.] **
$\sigma^{137} *** < 37$ (19 НП [settlements])					
ПП [F]	0,04 ÷ 0,09	0,04 ÷ 0,07	0,02 ÷ 0,04	0,01 ÷ 0,02	0,01 ÷ 0,02
ЭП [EC]	0,02 ÷ 0,08	0,02 ÷ 0,08	0,01 ÷ 0,04	< 0,01 ÷ 0,02	< 0,01 ÷ 0,02
КП [TF]	0,02 ÷ 0,04	–	–	–	–
СИЧ [WBC] (12 НП [settl.]****)	0,01 ÷ 0,03	0,01 ÷ 0,02	0,01 ÷ 0,03	0,01 ÷ 0,03	0,01 ÷ 0,03
$37 \leq \sigma^{137} < 185$ (136 НП [settlements])					
ПП [F]	0,04 ÷ 0,22	0,04 ÷ 0,17	0,02 ÷ 0,08	0,01 ÷ 0,04	0,01 ÷ 0,04
ЭП [EC]	0,01 ÷ 0,21	0,02 ÷ 0,22	0,01 ÷ 0,10	< 0,01 ÷ 0,06	< 0,01 ÷ 0,06
КП [TF]	0,04 ÷ 0,19	–	–	–	–
СИЧ [WBC] (96 НП [settl.])	0,01 ÷ 0,12	0,01 ÷ 0,07	0,01 ÷ 0,09	0,01 ÷ 0,04	0,01 ÷ 0,06
$185 \leq \sigma^{137} < 555$ (93 НП [settlements])					
ПП [F]	0,06 ÷ 0,41	0,05 ÷ 0,31	0,03 ÷ 0,15	0,02 ÷ 0,08	0,02 ÷ 0,08
ЭП [EC]	0,03 ÷ 0,33	0,03 ÷ 0,34	0,01 ÷ 0,15	0,01 ÷ 0,08	0,01 ÷ 0,08
КП [TF]	0,16 ÷ 0,54	–	–	–	–
СИЧ [WBC] (75 НП [settl.])	0,01 ÷ 0,28	0,01 ÷ 0,08	0,01 ÷ 0,11	0,01 ÷ 0,12	0,01 ÷ 0,12
$555 \leq \sigma^{137} < 1480$ (6 НП [settlements])					
ПП [F]	0,16 ÷ 0,24	0,13 ÷ 0,19	0,07 ÷ 0,10	0,04 ÷ 0,05	0,04 ÷ 0,05
ЭП [EC]	0,15 ÷ 0,21	0,15 ÷ 0,22	0,07 ÷ 0,10	0,04 ÷ 0,05	0,04 ÷ 0,05
КП [TF]	0,53 ÷ 1,1	–	–	–	–
СИЧ [WBC]	0,02 ÷ 0,07	0,02 ÷ 0,04	0,01 ÷ 0,05	0,02 ÷ 0,02	0,02 ÷ 0,03
$\sigma^{137} > 1480$ (1 НП [settlement])					
ПП [F]	0,2	0,15	0,08	0,04	0,04
ЭП [EC]	0,16	0,16	0,07	0,04	0,04

Модель * [Model]	взрослые [adults]	подростки [teenagers]	школьники [schoolchildr.]	дошк. орг. [presch. org.]**	дошк. неорг. [presch. unorg.]**
КП [TF]	1,8	–	–	–	–
СИЧ [WBC]	0,07	–	–	–	–

* Модели: «ПП» – оценка E^{int} по поступлению радионуклида с пищевыми продуктами с учетом результатов опросов населения о рационах питания; «ЭП» – оценка E^{int} по удельной активности радионуклида в основных дозообразующих пищевых продуктах (молоко, грибы, картофель) и их эффективному потреблению; «КП» – оценка E^{int} по коэффициентам перехода (КП) радионуклида из почвы в пищевые продукты (молоко, грибы) и их эффективному потреблению; «СИЧ» – оценка E^{int} по результатам СИЧ-измерений [Models: "F" – E^{int} assessment based on radionuclide intake with food products, taking into account the results of population diet ration surveys; "EC" – E^{int} assessment based on the specific activity of the radionuclide in the main dose-forming food products (milk, mushrooms, potatoes) and their effective consumption; "TF" – E^{int} assessment based on the transfer coefficients (TF) of the radionuclide from soil to foodstuffs (milk, mushrooms) and their effective consumption; "WBC" – E^{int} assessment based on the results of WBC-measurements].

** «дошк. орг.» – дошкольники организованные (посещающие детские учреждения), «дошк. неорг.» – дошкольники неорганизованные ["presch. org." – organized preschoolers, "presch. unorg." – unorganized preschoolers].

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

**** Приведено количество НП, где проводились СИЧ-измерения, если оно отличается от указанного количества НП. [The number of settlements where the WBC-measurements were carried out is given if it is different from the given number of settlements].

В таблице приведены значения СГЭД, оцененные по моделям «ПП» и «ЭП», без учета фактического наличия среди населения жителей определенной возрастной группы [The table shows the values of the average annual effective dose of internal exposure according to "F" and "EC" models, without taking into account the actual presence of residents of a certain age group among the population].

Наблюдаемые различия наглядно демонстрирует диаграмма рассеяния (рис. 1), на которой сопоставлены дозовые оценки для взрослых жителей НП типа I по моделям «ПП» и «ЭП» (панель «а»; коэффициент корреляции Пирсона $r=0,94$) и по моделям «СИЧ» и «ЭП» (панель «б»; коэффициент корреляции Пирсона $r=0,5$).

По нашим оценкам, средний вклад в дозу внутреннего облучения поступления в организм жителей ^{137}Cs с пищевыми продуктами природного происхождения

(определенный по модели «ПП») для взрослого населения варьирует от 50 до 65 % в зависимости от загрязненности местности ^{137}Cs . Остальная доля приходится на сельскохозяйственные пищевые продукты. Подобные оценки были получены нами в 2018 году [14], согласно которым для взрослого населения территорий 12 субъектов РФ с преобладанием дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв (как и в Брянской области) такой вклад в дозу внутреннего облучения в прошлой декаде столетия составлял 65 %.

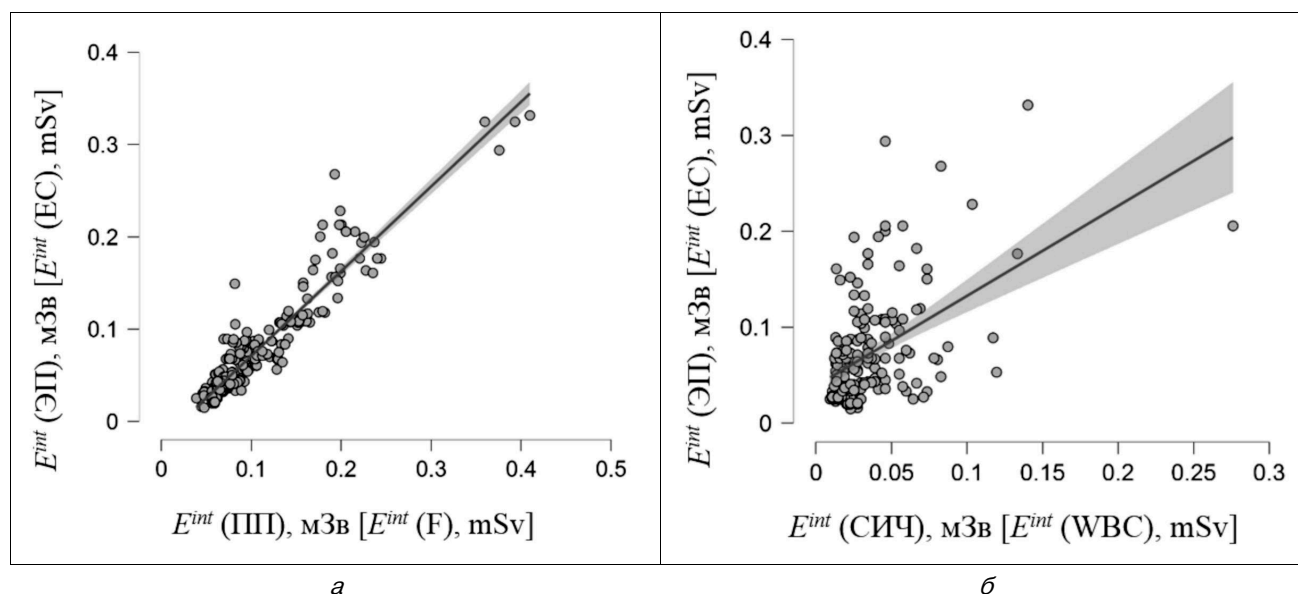


Рис. 1. Сопоставление СГЭД внутреннего облучения (E^{int}) взрослых жителей обследованных НП типа I]

[Fig. 1. Comparison of average annual effective doses of internal exposure (E^{int}) of adult residents of settlements "Type I"]

Результаты дозовых расчетов для критической (наиболее облучаемой) группы жителей обследованных НП (СГЭД КГ) представлены в таблице 2. Для оценки доз облучения

критической группы использовались соответствующие коэффициенты соотношения СГЭД и СГЭД КГ из методического документа МУ 2.6.1.2003-05.

Таблица 2. СГЭД внутреннего облучения критической группы населения, мЗв
[Table 2. Average annual effective dose of internal exposure of the critical group, mSv]

Плотность загрязнения ¹³⁷ Cs почвы территории НП, кБк/м ² [¹³⁷ Cs soil surface activity in settlements, kBq/m ²]	Модель [Model]*			
	ПП ^{КТ} [F ^{CG}]	ЭП ^{КТ} [EC ^{CG}]	КП ^{КТ} [TF ^{CG}]	СИЧ ^{КТ} [WBC ^{CG}]
<i>НП типа I [Settlements "Type I"]</i>				
< 37 (19 НП [settl.])**	0,12 ÷ 0,26***	0,06 ÷ 0,24	0,07 ÷ 0,12	0,04 ÷ 0,09 (12 НП [settl.])
37 – 185 (135 [settl.])	0,12 ÷ 0,67	0,05 ÷ 0,64	0,12 ÷ 0,58	0,03 ÷ 0,35 (96 НП [settl.])
185 – 555 (92 НП [settl.])	0,18 ÷ 1,2	0,1 ÷ 0,99	0,48 ÷ 1,7	0,04 ÷ 0,83 (75 НП [settl.])
555 – 1480 (6 НП [settl.])	0,47 ÷ 0,71	0,44 ÷ 0,62	1,6 ÷ 3,5	0,08 ÷ 0,22
> 1480 (1 НП [settl.])	0,6	0,48	5,5	0,22
<i>НП типа II [Settlements "Type II"]</i>				
37 – 185 (1 НП [settl.])	0,28	0,37	0,58	0,1
185 – 555 (1 НП [settl.])	0,43	0,28	1,4	0,12

* Обозначения моделей даны в примечании к таблице 1 применительно к критической группе (КТ) населения [The designations of the models are given in the notes to Table 1 in relation to the critical group (CG)].

** В скобках указано количество НП, для которых представлены результаты исследований [The number of the settlements is given in parentheses].

*** В таблице приведен диапазон значений СГЭД облучения критических групп населения НП, находящихся в указанных границах загрязнения почвы ¹³⁷Cs. [The table shows the range of values of the average annual effective dose of internal exposure of critical groups in settlements located within the boundaries of soil contamination by ¹³⁷Cs].

Если сопоставить дозовые оценки внутреннего облучения для критической группы населения НП с установленным для населения РФ пределом доз техногенного облучения⁵, определенным в 1 мЗв в год, то только по внутреннему облучению этот норматив будет превышен для трех НП согласно оценкам по модели «ПП»; для одного НП оцененное значение дозы по модели «ЭП» близко к дозовому пределу, для 42 НП, согласно расчетам по модели «КП», дозовый предел превышен. Однако следует принять во внимание, что методика расчета СГЭД внутреннего облучения, изложенная в МУ 2.6.1.2003-05, допускает использование алгоритма расчета с КП ¹³⁷Cs из почвы в пищевые продукты, но при наличии информации об удельной активности радионуклида в пищевых продуктах, полученной по результатам инструментальных исследований, предпочтительней использовать результаты измерений содержания ¹³⁷Cs в пищевых продуктах.

Сопоставительный анализ дозиметрических расчетов, выполненных по разным моделям оценки доз внутреннего облучения, выявил необходимость внесения корректив в действующие методы расчета в согласии с современными обстоятельствами и особенностями жизнедеятельности населения радиоактивно загрязненных территорий. Выполненный ранее анализ параметров радиационной обстановки и изучение социально-демографических характеристик обследованных НП [5–9] позволил провести предварительный пересмотр ряда модельных параметров.

Согласно принятой методологии дозовых оценок, НП

чернобыльских территорий подразделяются на три типа НП [10], различающиеся количеством населения и долей населения с личными подсобными хозяйствами. Анализ результатов СИЧ-измерений [9] позволил предположить, что целесообразно рассмотреть малые НП с численностью менее 100 человек как самостоятельную категорию. В нашем исследовании такой тип НП обозначен как «НП типа I» и последующие расчеты выполнены с его учетом. Для прочих НП с численностью до 10 тыс. человек оставлено прежнее название «НП типа I».

К одному из модельных параметров, который требует обновления, относится коэффициент перехода ¹³⁷Cs из почвы в пищевой продукт методических документов МУ 2.6.1.2003-05 и МУ 2.6.1.3152-13. На данном этапе исследования был проведен его пересчет на конец 2022 года. В итоге получили следующие, более низкие относительно прежних, значения (единица измерения – 10⁻³ м²/кг): для молока – 0,21 (торфяно-болотные почвы), 0,16 (песчаные и супесчаные), 0,04 (легко- и среднесуглинистые), 0,01 (тяжелосуглинистые и глинистые); для грибов – 13 (торфяно-болотные), 8,6 (песчаные и супесчаные), 2,6 (легко- и среднесуглинистые), 0,64 (тяжелосуглинистые и глинистые).

Использование модельного параметра «эффективное потребление» в дозиметрических расчетах доз внутреннего облучения позволяет существенно оптимизировать радиационный мониторинг на восстановительной стадии аварии. Использование эффективного потребления двух-

⁵ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 No 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный No 14534). [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.)]

трех основных дозообразующих пищевых продуктов позволяет учитывать вклад в дозу других компонентов рациона питания. С целью определения актуальных численных значений этого модельного параметра были выполнены оценки эффективного годового потребления молока (эквивалент сельскохозяйственных пищевых продуктов) и грибов (эквивалент пищевых продуктов природного происхождения) для следующих возрастных категорий жителей: взрослые, подростки, школьники, дошкольники. Недостаток информации по неорганизованным дошкольникам не позволил на данном этапе исследования выделить их в отдельную категорию, однако в дальнейших исследованиях мы планируем продолжить изучение рационов питания этой категории жителей. Полученные оценки для взрослых жителей (для НП типа Im (в кг/год): грибы – 8, молоко – 200; НП типа I (в кг/год): грибы – 7, молоко – 170; НП типа II (в кг/год): грибы – 5, молоко – 70) хорошо согласуются с результатами работы, изложенной в публикации [15], согласно которой для данной категории населения эффективное годовое потребление молока для НП с численностью населения до 10 тыс. человек составляет 170 кг, грибов – 9 кг. Для взрослых жителей более крупных НП в 2019-2022 гг. получены иные оценки, однако следует признать, что в данном исследовании к категории НП свыше 10 тыс. человек относились только два НП (в публикации [20] оценки проведены для населения 12 субъектов РФ) и оценки для жителей крупных НП в дальнейшем следует пересмотреть.

В действующих методических документах для связи удельной активности ^{137}Cs в теле человека, определенной по результатам СИЧ-измерения, с годовой эффективной дозой внутреннего облучения (в мЗв) используется дозовый коэффициент (k_d , (мЗв·кг)/(кБк·год)), равный 2,3. Коэффициент с указанным значением используется как для взрослого населения, так и для детского. В нашем исследовании с использованием методов регрессионного анализа мы выполнили дифференцирование этого модельного параметра по возрасту и принадлежности жителей к НП того или иного типа. Более устойчивые результаты были получены для взрослых жителей (k_d для НП типа Im – 2,3, НП типа Im – 2,43, НП типа II – 3,75).

По результатам выполненных модификаций модельных параметров были проведены новые расчеты СГЭД внутреннего облучения (E^{int}) жителей обследованных НП. В модифицированной модели оценки дозы внутреннего облучения E^{int} по удельной активности ^{137}Cs в основных дозообразующих пищевых продуктах (молоко, грибы) (модель «ЭП м») были использованы обновленные данные об их эффективном годовом потреблении населением. Ранее оцененные нормированные на плотность загрязнения ^{137}Cs почвы НП величины удельной активности в молоке и грибах [7, 8], полученные по результатам анализа массива данных за 2019-2022 гг. о содержании ^{137}Cs в местных пищевых продуктах, позволили выполнить расчеты E^{int} с учетом этих коэффициентов перехода радионуклида из почвы в пищевой продукт. Такая оценка СГЭД внутреннего облучения (модель «ЭП а») была выполнена также на основе новых данных об эффективном потреблении молока и грибов. Обновленные значения коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в молоко и грибы методических документов МУ 2.6.1.2003-05 и МУ 2.6.1.3152-13 и новое эффективное потребление молока

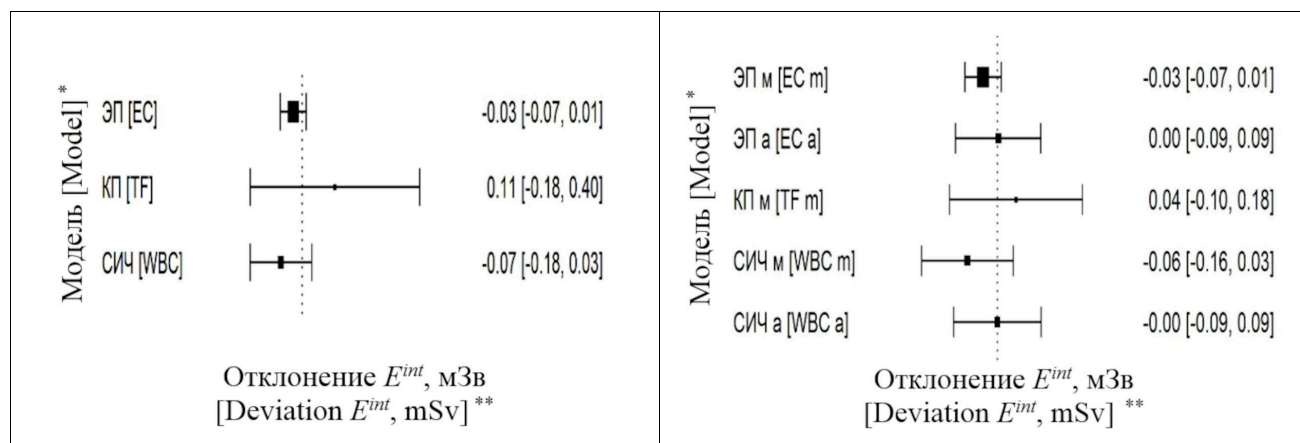
и грибов были использованы при расчетах по модели «КП м». Модификация дозовых коэффициентов, используемых в модели расчета дозы внутреннего облучения по результатам измерения содержания ^{137}Cs в теле человека, была учтена при расчетах по модели «СИЧ м». Нормированные величины удельной активности ^{137}Cs в теле человека на плотность загрязнения ^{137}Cs почвы НП, полученные в работе [9], и новые дозовые коэффициенты для оценки СГЭД по данным СИЧ-измерений позволили рассчитать дозу внутреннего облучения, которую могли бы иметь жители, проживая на территориях с известным загрязнением почвы ^{137}Cs (модель «СИЧ а»).

В качестве модели сличения была принята модель «ПП» как основанная на широком наборе местных пищевых продуктов с большим объемом исследований по определению содержания в них ^{137}Cs и представительным массивом информации по их потреблению населением. СИЧ-модель для этой цели на данном этапе исследования была отклонена ввиду необходимости ее более тщательного анализа. Чтобы сопоставить расчеты СГЭД внутреннего облучения по разным моделям было оценено численное отличие (в мЗв) величин той или иной модели от соответствующих величин, оцененных по модели «ПП». Отличие определялось для каждой возрастной категории жителей каждого обследованного НП. Рисунок 2 позволяет визуальнo оценить результаты сопоставления расчетов, выполненных по разным моделям для взрослых жителей НП типа I, относительно расчетов по модели «ПП» (на рисунке обозначена пунктирной линией) до корректирования модельных параметров (панель «а») и после (панель «б»).

Результаты корректирования модельных параметров дали положительный эффект: расчеты по модифицированным моделям в той или иной степени позволили снизить различия в оценках дозы внутреннего облучения жителей.

Модели «ЭП а» и «СИЧ а» учитывают не только нормированные величины удельных активностей, но также и их изменение в зависимости от уровней загрязненности почвы ^{137}Cs . Эти модели разработаны в рамках настоящего исследования и построены с использованием методов регрессионного анализа. Использование моделей «ЭП а» и «СИЧ а» может быть полезно на практике для планирования радиационно-гигиенических обследований и/или объема радиационного мониторинга. Согласно принятой методологии оценки доз облучения [10], НП чернобыльских территорий принято делить не только по типам (численность жителей и т.д.), но и по группам: «НП группы 1» – НП, где предварительная оценка дозы для критической группы населения составляет величину менее 1,0 мЗв/год; «НП группы 2» – НП, где таковая величина равна или более 1,0 мЗв/год. Модели «ЭП а» и «СИЧ а» позволяют выполнить такие предварительные расчеты.

В контексте радиационной безопасности проживания населения на территориях чернобыльского следа, как и упомянуто выше, наибольший интерес представляют расчеты СГЭД внутреннего облучения для его критической группы. Рисунок 3 демонстрирует отличие результатов расчетов, выполненных по модифицированным моделям, от расчетов, выполненных по модели по поступлению с местными пищевыми продуктами (модель «ПП»; также обозначена на рисунке пунктирной линией) в отношении критической группы (КГ) населения.



до корректирования [before correction] (a)

после корректирования [after correction] (б)

Рис. 2. Сопоставление отклонений значений СГЭД внутреннего облучения (E^{int}) взрослых жителей НП типа I (a) и НП типа I (б), рассчитанных по разным моделям, от дозы E^{int} , рассчитанной по модели поступления радионуклидов с пищевыми продуктами «ПП», мЗв

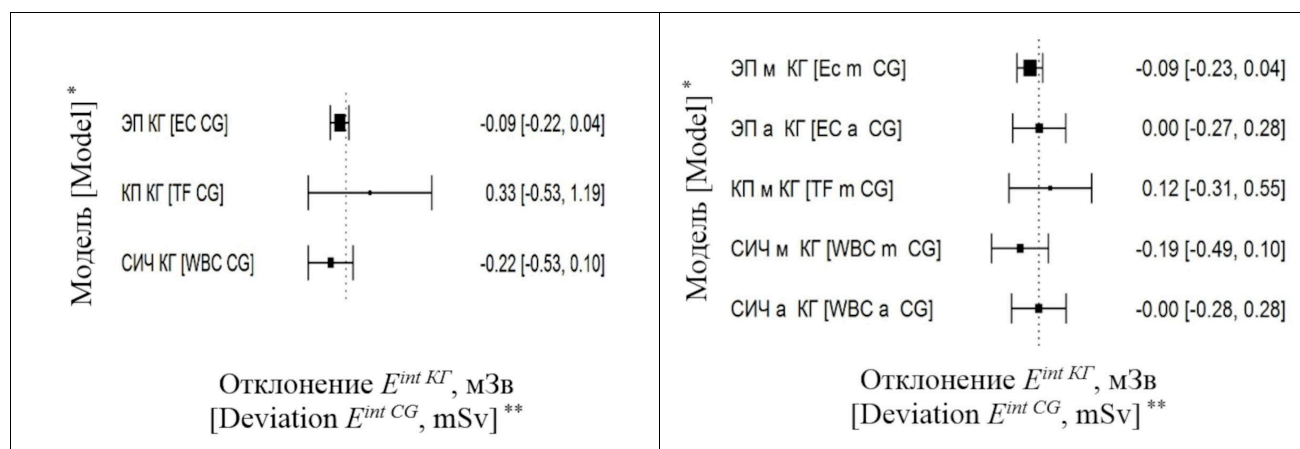
* Обозначения моделей даны в примечании к таблице 1 и в тексте статьи.

** Приведены средние значения отклонений (и дан диапазон стандартного отклонения от среднего) величин E^{int} , рассчитанных по разным моделям, от величин E^{int} , рассчитанных по модели «ПП» (пунктирная линия графика).

[Fig. 2. Comparison of deviations of the average annual effective dose of internal exposure (E^{int}) of adults of the settlement "Type I" (a) and both the settlement "Type Is" and "Type I" (б) calculated using different models from the dose E^{int} calculated using the model "F", mSv

* The designations of the models are given in the note to Table 1 and in the article text.

** The average values of deviations (and the range of standard deviations from the average) of the E^{int} values calculated using different models from the E^{int} values calculated using the F model (dotted line are given.)



до корректирования [before correction] (a)

после корректирования [after correction] (б)

Рис. 3. Сопоставление отклонений значений СГЭД внутреннего облучения критической группы населения ($E^{int}_{КГ}$) обследованных НП типа I (a) и НП типа I (б), рассчитанных по разным моделям, от дозы ($E^{int}_{КГ}$), рассчитанной по модели поступления радионуклидов с пищевыми продуктами (модель «ПП КГ»), мЗв

* Обозначения моделей даны в примечании к таблицам 1 и 2 и в тексте статьи.

** Приведены средние значения отклонений (и дан диапазон станд. отклонения от среднего) величин $E^{int}_{КГ}$, рассчитанных по разным моделям, от величин $E^{int}_{КГ}$, рассчитанных по модели «ПП КГ» (пунктирная линия графика).

[Fig. 3. Comparison of deviations of the average annual effective dose of internal exposure of critical group ($E^{int}_{КГ}$) of the settlement "Type I" (a) and both the settlements "Type Is" and "Type I" (б) calculated using different models from the dose $E^{int}_{КГ}$ calculated using the model "F^{CG}", mSv

* The designations of the models are given in the notes to Table 1 and Table 2 as well as in the article text.

** The average values of deviations (and the range of standard deviations from the average) of the $E^{int}_{КГ}$ values, calculated using different models, from the $E^{int}_{КГ}$ values, calculated using the "F^{CG}" model (dashed line on the graph) are given.

Корректирование модельных параметров с учетом современной радиационной обстановки позволило уточнить количество НП, где наиболее облучаемая часть населения имеет СГЭД внутреннего облучения свыше 1 мЗв: норматив будет превышен для одного НП по модели «ЭП м» (как и прежде) и для 22 НП согласно расчетам по модели «КП м».

Заключение

На современном этапе радиационной аварии на ЧАЭС СГЭД внутреннего облучения населения НП юго-западных территорий Брянской области, оцененные по инструментальным моделям, не превышают 1 мЗв, а для большинства обследованных НП не зафиксировано превышения 1 мЗв и для критической группы населения. Однако в отдельных НП СГЭД критической группы населения может достигать 5 мЗв (по консервативным оценкам). Наибольший вклад в дозу внутреннего облучения населения вносят пищевые продукты природного происхождения.

Выполненные дозовые оценки подтвердили устойчивость методологии оценки доз внутреннего облучения населения черномыльских территорий в своих базисных принципах. Однако часть модельных параметров нуждается в корректурах. Результаты ранее проведенного анализа [5–9] позволили выявить современные особенности формирования доз внутреннего облучения населения и выполнить модификацию дозиметрических моделей. Результаты корректирования дали положительный эффект: расчеты по модифицированным моделям в той или иной степени позволили снизить различия в оценках дозы внутреннего облучения жителей. Однако предпринятые на данном этапе исследования изменения имеют предварительный характер и требуют дальнейшей проработки.

Помимо предпринятых в данном исследовании шагов по совершенствованию методологии оценки доз внутреннего облучения населения черномыльских территорий, остается еще ряд вопросов, требующих рассмотрения.

Изучение путей формирования доз облучения – важная задача в системе радиационной защиты населения как в начальный период радиационной аварии, так и в ее отдаленном периоде. Именно постоянный мониторинг радиационной обстановки и ее анализ позволяет получить представление о дозовых нагрузках на население и на его наиболее облучаемых представителей.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

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

Братилова А.А. – организация экспедиционных исследований, сбор и систематизация данных, поиск литературных источников.

Брук Г.Я. – разработка концепции, определение цели и формулирование задач исследования.

Жеско Т.В. – обработка первичных материалов исследования.

Романович И.К. – общее руководство проектом, разработка концепции изложения материалов исследования.

Благодарности

Авторы выражают благодарность и признательность за содействие в работе специалистам Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, а также сотрудникам ФБУЗ ЦГиЭ в Брянской области. Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания и рекомендации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование выполнено в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2026–2030 гг. по теме: «Совершенствование моделей расчета доз облучения населения территорий РФ, загрязненных радиоактивными выпадениями вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, для обеспечения радиационной защиты в отдаленные сроки».

Литература

1. ICRP. Application of the Commission's Recommendations to the Protection of Individuals Living in Long Term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. ICRP Publication 111 // Annals of the ICRP. 2009. Vol. 39, No 3. P. 1–74.
2. МАГАТЭ. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление: Двадцатилетний опыт: доклад экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума. Вена: МАГАТЭ, 2008. 180 с.
3. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. Санкт-Петербург: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2016. Т. 1. 448 с.
4. Балонов М.И., Анисимова Л.И., Перминова Г.С. Критерии защиты населения и реабилитации территорий России в отдаленный период после чернобыльской аварии // Радиация и риск. 1999. № 11. С. 108–116.
5. Романович И.К., Базюкин А.Б., Барковский А.Н. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 1: Характеристика населенных пунктов // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 22–36.
6. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 2: Структура рационов питания населения: // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 7–21.
7. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 3: Содержание радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 7–17.
8. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Содержание ^{137}Cs в пищевых продуктах природного происхождения по результатам современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 7–17.
9. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Содержание ^{137}Cs в организме жителей населенных пунктов Брянской области по результатам радиационно-гигиенических обследований // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 7–18.
10. Оценка доз облучения населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС: Сборник методических документов. Издание третье. Санкт-Петербург, 2011. 456 с.

11. International Atomic Energy Agency. Assessment of doses to the public from ingested radionuclides. Vienna: IAEA, 1999. 95 с.
12. Шутов В.Н., Кадука М.В., Кравцова О.С. и др. Защита от радиации. СПб, 2011. 88 с.
13. ICRP. Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72 // Annals of the ICRP. 1996. Vol. 26, No 1. P. 1–108.
14. Братилова А.А., Брук Г.Я. Влияние потребления различных пищевых продуктов на формирование доз внутреннего облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 53–59.
15. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2019. № 2(22). С. 17–23.

Поступила: 05.05.2026

Кравцова Ольга Сергеевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: olga.s.kravtsova@mail.ru; ORCID: 0009-0008-5543-5411, РИНЦ Author ID: 651947

Базюкин Анатолий Борисович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-9853-0696, РИНЦ Author ID: 649202

Братилова Анжелика Анатольевна – старший научный сотрудник, заведующая лабораторией внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-6489-3974, РИНЦ Author ID: 183297

Брук Геннадий Яковлевич – кандидат технических наук, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-9558-7558

Жеско Татьяна Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0007-1678-2931, РИНЦ Author ID: 651942

Романович Иван Константинович – доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, директор Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0003-0668-459X, РИНЦ Author ID: 422310

Для цитирования: Кравцова О.С., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я., Жеско Т.В., Романович И.К. Дозовые оценки внутреннего облучения жителей населенных пунктов Брянской области по результатам обследований 2019–2022 гг. // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 7–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-7-17

Dose assessments of internal exposure for residents of populated areas of the Bryansk region according to the 2019–2022 survey

Olga S. Kravtsova, Anatoly B. Bazyukin, Anzhelika A. Bratilova, Gennadiy Ya. Bruk, Tatyana V. Zhesko, Ivan K. Romanovich

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

This article presents results of internal radiation dose assessments for the population based on radiation and hygienic surveys of settlements in the Bryansk region bordering the Republic of Belarus in 2019–2022. The objective of the study was to perform dose assessments with various models and to determine model parameters to updating. Materials and Methods: Calculations were performed for different age groups of the

Olga S. Kravtsova

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

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

population of the surveyed settlements in the Bryansk region, as well as for critical groups, in accordance with current methodological documents. The results of comprehensive radiation and hygienic survey of settlements and radiation monitoring data were used for dose assessments. Results and Discussion: The greatest deviations from the model for ^{137}Cs intake with food products (covering the majority of local food products and their consumption by the population) were obtained for the model which parameters are the coefficients of radionuclide transfer from soil to food products (milk and mushrooms) for the adult population living in areas with high levels of soil contamination (more than 555 kBq/m^2 by ^{137}Cs). At the same time, for the population of other areas (the majority of the surveyed settlements), the convergence of the dose assessment results is satisfactory. Conclusion: The average annual effective doses of internal exposure to the population of the surveyed settlements do not exceed 1 mSv , and the internal doses to the critical groups do not exceed 5 mSv . Food products of wild origin make a greater contribution to the internal radiation dose than local agricultural food products. The methodology for dose assessment to the population of the Chernobyl territories has proven its stability in basic approaches. Modification of several model parameters has allowed to improve calculation results.

Key words: accident at the Chernobyl NPP, population, internal exposure, cesium-137.

Authors' personal contribution

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

Bazyukin A.B. – search and analysis of literary data sources, collection and systematization of research materials.

Bratilova A.A. – organization of expedition works, collection and systematization of data, search of literature sources.

Bruk G.Ya. – concept development, definition of the goal and formulation of the research objectives, project design, coordination of the work of the project participants.

Zhesko T.V. – collection of primary research materials.

Romanovich I.K. – general management of the project, development of the concept of presentation of research materials.

Acknowledgements

The authors express their gratitude and appreciation for assistance in the work to employees of the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. P.V. Ramzaev, as well as to employees of FBUZ CDPH in Bryansk region. The authors are grateful to the reviewers for their constructive comments and recommendations.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The study was performed within the framework of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing program for 2026–2030 on the topic: “Improving models for calculating radiation doses to the population of the territories of the Russian Federation contaminated with radioactive fallout due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant, to ensure radiation protection in the long-term phase.”

References

- ICRP. Application of the Commission's Recommendations to the Protection of Individuals Living in Long Term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. ICRP Publication 111. *Annals of the ICRP*. 2009;39(3): 1–74.
- IAEA. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Mitigation: Twenty-Year Experience: Report of the Ecology Expert Group of the Chernobyl Forum. Vienna: IAEA; 2008. 180 p. (In Russian).
- Onishchenko GG, Popova AYu (eds.). Radiation-Hygienic Aspects of Mitigating the Consequences of the Chernobyl Accident. St. Petersburg: NIIRG named after prof. P.V. Ramzaev; 2016. 448 p. (In Russian).
- Balonov MI, Anisimova LI, Perminova GS. Criteria for Population Protection and Rehabilitation of Russian Territories in the Late Period after the Chernobyl Accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 1999;(11): 108–116. (In Russian).
- Romanovich IK, Bazyukin AB, Barkovsky AN, Biblin AM, Bratilova AA, Bruk GYa, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 1: Characteristics of the settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 22–36. (In Russian).
- Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Varfolomeeva KV, Drozdova EA, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 2: Population's food preferences (diet). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 7–21. (In Russian).
- Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Drozdova EA, Zhesko TV, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 3: Radionuclide content in agricultural food products. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 7–17. (In Russian).
- Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Zhesko TV, Kaduka MV, et al. The current levels of ^{137}Cs in foodstuffs of wild origin according to the results of the radiation-hygienic survey of the Bryansk region settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(1): 7–17. (In Russian).
- Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Zhesko TV, Kaduka MV, et al. The current levels of ^{137}Cs in the body of residents of populated areas of the Bryansk region according to the results of radiation and hygienic survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(4): 7–18. (In Russian).
- Assessment of radiation doses to the population of the Russian Federation due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant: Collection of methodological documents. Third edition. St. Petersburg; 2011. 456 p.
- International Atomic Energy Agency. Assessment of doses to the public from ingested radionuclides. Vienna: IAEA; 1999. 95 p.
- Shutov VN, Kaduka MV, Kravtsova OS, Parkhomenko VI, Samoilenko VM. Protection from radiation. Saint Petersburg: Textbook; 2011. 88 p. (In Russian).

13. ICRP. Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. *Annals of the ICRP*. 1996;26(1): 1–108.
14. Bratilova AA, Bruk GYa. Effect of Consumption of Various Food Products on the Formation of Internal Radiation Doses of the Adult Population of the Russian Federation after the Chernobyl Accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 53–59. (In Russian).
15. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. Patterns of Formation and Forecast of Internal Radiation Doses of the Population of the Bryansk Region in the Late Period after the Chernobyl Accident. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatel'nosti = Medical and Biological Problems of Life Activity*. 2019;2(22): 17–23. (In Russian).

Received: May 05, 2026

For correspondence: Olga S. Kravtsova – Candidate of Biological Sciences, Acting 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 (8, Mira Str., Saint Petersburg, Russia, 197101; E-mail: olga.s.kravtsova@mail.ru); ORCID: 0009-0008-5543-5411, RSCI Author ID: 651947

Anatoly B. Bazyukin – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Internal Irradiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-9853-0696, RSCI Author ID: 649202

Angelika A. Bratilova – Head of the Laboratory of Internal Exposure at the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-6489-3974, RSCI Author ID: 183297

Gennadiy Ya. Bruk – Candidate of Technical Sciences, 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: 0000-0002-9558-7558

Tatiana V. Zhesko – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Internal Irradiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0007-1678-2931, RSCI Author ID: 651942

Ivan K. Romanovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0003-0668-459X, RSCI Author ID: 422310

For citation: Kravtsova O.S., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Bruk G.Ya., Zhesko T.V., Romanovich I.K. Dose assessments of internal exposure for residents of populated areas of the Bryansk region according to the 2019-2022 survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 7–17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-7-17

Оценка радиопротекторной эффективности водорастворимой натриевой соли *n*-ацетилцистеина в экспериментальных исследованиях

Попова А.А.¹, Чипига Л.А.^{1,2,3}, Майстренко Д.Н.¹, Евтушенко В.И.¹, Станжевский А.А.¹, Николаев Д.Н.¹, Понежа Т.Е.¹, Виноградова Ю.Н.¹, Иоффе Е.Б.¹, Майстренко А.Д.³

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

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

Несмотря на разработку ряда радиопротекторов, их клиническое применение ограничено токсичностью, узким временем действия и низкой эффективностью после облучения. Это определяет потребность в поиске новых безопасных и эффективных средств радиозащиты. Целью настоящего исследования является изучение радиопротекторной активности водорастворимой натриевой соли *n*-ацетилцистеина. Материалы и методы: В эксперименте использовали 252 половозрелых самца крыс линии Вистар для определения радиозащитной дозы натриевой соли *n*-ацетилцистеина, оценки эффективности его профилактического введения перед гамма-облучением и анализа динамики гематологических показателей периферической крови. Препарат вводили внутривентрально за 1 или 3 часа до облучения либо за 1 час после воздействия. Облучение проводили на установке ИГУР-1 в дозе 7,0 Гр (ЛД_{95-100/30}). Рабочий раствор натриевой соли *n*-ацетилцистеина (300 мг/мл, рН 7,5) готовили *ex tempore* путём растворения 3 г сухого вещества в 3 мл дистиллированной воды с последующим добавлением 3,5 мл раствора 5N NaOH и дотитровкой до нужного рН. Результаты исследования и обсуждение: Внутривентральное введение натриевой соли *n*-ацетилцистеина в дозе 2500 мг/кг способствует частичному сохранению гемопоэза у животных, облучённых в поглощённой дозе 7,0 Гр (ЛД_{95-100/30}), а также обеспечивает сохранение клеточного пула гемопоэтической системы и ускорение процесса его восстановления. При изучении специфической активности *n*-ацетилцистеина установлено, что введение в дозе 2000 мг/кг обеспечивает выживаемость облучённых в смертельной дозе животных на 42 %. Заключение: Проведённые исследования на крысах продемонстрировали целесообразность дальнейшего изучения фармакодинамических свойств натриевой соли *n*-ацетилцистеина с учётом её выраженного потенциала в качестве радиопротекторного агента.

Ключевые слова: натриевая соль *n*-ацетилцистеина, радиопротекторы, радиационное поражение, крысы Вистар, облучение, средняя продолжительность жизни, летальность.

Введение

Большой практический интерес к радиопротекторам кратковременного действия обусловлен их способностью быстро (за несколько минут) повышать устойчивость организма к действию радиации и в высоких противолучевых свойствах, в том числе при смертельных дозах облучения, которых нет у других групп противорадиационных препаратов [1–3]. К настоящему времени разработан широкий спектр средств и методов профилактики острых радиационных поражений с применением радиопротекторов, относящихся к различным группам веществ, в том числе и антиоксидантам. Одним из антиоксидантов, который широко используется в клинической практике для лечения различных заболеваний, является *n*-ацетилцистеин (NAC), выступая предшественником глутатиона, регулирующего окислительно-восстановительные процессы.

Результаты экспериментальных исследований показали, что NAC оказывает терапевтическое воздействие на вызванное рентгеновским излучением повреждение островковых клеток [4], защитное действие на радиационно-индуцированный мукозит полости рта как *in vivo*, так и *in vitro* [5], а также защитное действие при радиационно-индуцированном повреждении почек у крыс [6]. В отдельных работах показано снижение высвобождения лактатдегидрогеназы в кардиомиоцитах при воздействии рентгеновским излучением [7], положительное влияние на радиационно-индуцированную генотоксичность и цитотоксичность в костном мозге крыс [8], ослабление негативного влияния лучевой терапии и заживление послеоперационных повреждений с точки зрения воспаления, грануляции, отложения коллагена, реэпителизации и неоваскуляризации, посредством снижения маркеров окислительного стресса и улучшения

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

гистологических параметров независимо от способа введения [9], возможность профилактики желудочно-кишечного синдрома у пациентов, проходящих лучевую терапию при лечении злокачественных новообразований [10].

Цель исследования – изучение радиопротекторной активности водорастворимой натриевой соли п-ацетилцистеина (натриевой соли NAC).

Задачи исследования

1. Изучение эффективности профилактического введения натриевой соли NAC у крыс на фоне гамма-облучения в поглощенной дозе (дозе) 7,0 Гр.
2. Оценка влияния натриевой соли NAC на значения гематологических показателей периферической крови крыс на 30 сутки после облучения в дозе 7,0 Гр.
3. Исследование значений гематологических показателей периферической крови крыс на 7, 15 и 30 сутки после облучения в дозе 7,0 Гр.

Материалы и методы

Приготовление рабочего раствора

Для экспериментальных работ использовали раствор натриевой соли NAC концентрации 300 мг/мл с pH 7,5.

Для ее приготовления в мерный стакан насыпали 3 г сухого NAC, наливали 3 мл дистиллированной воды и помещали на магнитную мешалку. При постоянном перемешивании медленно добавляли 3,5 мл раствора 5N NaOH, в процессе добавления суспензия растворялась, получался раствор слегка желтого цвета с запахом сероводорода. Измерение pH проводили с помощью лакмусовой бумажки. Для получения pH в диапазоне 7,5–8,0 раствор дотитровывали 5N NaOH.

Экспериментальные животные

Экспериментальные работы проводились на 252 крысах (половозрелых самцах) породы Вистар массой 180–220 г, полученных из питомника «Рапполово» (Ленинградская область) [11]. Крыс содержали в стандартных условиях вивария (температура воздуха 18–24 °C, относительная влажность воздуха – 40–80 %). Доступ к корму и воде не ограничивали. Срок карантирования животных после поступления в виварий составлял 14 суток. После окончания карантина животных распределили на группы методом рандомизации (табл. 1), больных и ослабленных животных в эксперимент не включали.

Таблица 1. Распределение животных по группам в соответствии с целями экспериментальных исследований

[Table 1. Groups of animals according to the objectives of experimental studies]

Задача [Objective]	Число групп [Number of groups]	Число особей в группе [Number of animals per group]	Примечание [Note]
Оценка эффективности натриевой соли NAC при облучении крыс в разных концентрациях на фоне гамма-облучения в дозе 7,0 Гр [Assessment of the efficacy of sodium salt of NAC in rats at different concentrations under gamma irradiation at a dose of 7.0 Gy]	4	12	за 1 час до облучения вводили раствор натриевой соли NAC в разных концентрациях [Sodium salt NAC at different concentrations was given intraperitoneally at 1 h prior to irradiation]
	1	12	за 1 час до облучения вводили плацебо* [Placebo* was injected 1 h before irradiation]
Изучение эффективности профилактического введения натриевой соли NAC у крыс на фоне гамма-облучения в дозе 7,0 Гр [Evaluation of prophylactic sodium salt NAC in gamma-irradiated rats (7.0 Gy)]	2	18	за 1 или 3 часа до облучения вводили раствор натриевой соли NAC [Sodium salt NAC was given intraperitoneally at 1 h or 3 h prior to irradiation]
	2 контроль [Control]	12	за 1 или 3 часа до облучения вводили плацебо* [Placebo* was injected 1 h or 3 h before irradiation]
Значения гематологических показателей периферической крови крыс на 30 суток после облучения в дозе 7,0 Гр при применении натриевой соли NAC в дозе 2500 мг/кг [Hematological parameters of peripheral blood in rats on day 30 after irradiation at a dose of 7.0 Gy with administration of sodium salt NAC at 2500 mg/kg]	2	12	за 1 или 3 ч до облучения вводили раствор натриевой соли NAC [Sodium salt NAC was given intraperitoneally at 1 h or 3 h prior to irradiation]
	2	12	Интактный контроль и плацебо*+ облучение [Intact control and placebo*+ irradiation]
Исследование значений гематологических показателей периферической крови крыс на 7, 15 и 30 сутки после облучения в дозе 7,0 Гр [Study of hematological parameters in peripheral blood of rats on days 7, 15, and 30 after irradiation at a dose of 7.0 Gy]	2	12	за 1 ч до облучения вводили раствор натриевой соли NAC [Sodium salt NAC was given 1 hour prior to irradiation]
	2	12	Интактный контроль и плацебо*+ облучение [Intact control and placebo*+ irradiation]

* животным контрольной группы внутрибрюшинно вводили воду для инъекций в объеме 1 мл на крысу [* the control group received 1 ml of vehicle (sterile water for injection) via intraperitoneal route.]

Проведение экспериментальных работ

Экспериментальные работы проводили на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Министерства обороны Российской Федерации. По окончании эксперимента все животные подвергались эвтаназии. Экспериментальную работу проводили в соответствии с принципами биоэтики и согласно требованиям нормативно-правовых документов о порядке проведения исследовательских работ с применением животных^{1,2}, рекомендации Федерации европейских научных ассоциаций по содержанию и использованию лабораторных животных в научных исследованиях (FELASA) [12].

Острое гамма-облучение моделировали при помощи установки ИГУР-1, содержащей ¹³⁷Cs. Крыс подвергали относительно равномерному однократному облучению γ -квантами в дозе 7,0 Гр (ЛД_{95-100/30}) при мощности дозы облучения 0,998 Гр/мин. в алюминиевых пеналах по 6 крыс в каждом, при этом каждая особь находилась в индивидуальном отсеке.

Во время проведения исследования у лабораторных крыс забирали кровь из хвостовой вены в объеме 0,2–0,5 мл в пробирки, содержащие этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТА). Определение общего количества гематологических показателей периферической крови проводили с помощью ветеринарного автоматического гематологического анализатора URIT-5160 [13].

После облучения определяли выживаемость животных и среднюю продолжительность жизни (СПЖ).

Течение и исходы острого радиационного поражения оценивали по величине выживаемости и СПЖ облученных животных. Наблюдение за крысами осуществляли в течение 30 суток. Расчет выживаемости (N, %), проводили по формуле (1):

$$N = \frac{A}{B} \times 100, \quad (1)$$

где A – количество крыс, выживших к концу 30-ти-суточного наблюдения, абс. ед.;

B – общее количество крыс в группе, абс. ед.;

100 – коэффициент для перевода в проценты.

Расчет СПЖ крыс проводили с использованием формулы (2):

$$СПЖ = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_i}{N}, \quad (2)$$

где T₁, T₂ ..., T_i – продолжительность жизни отдельной крысы после облучения, сут;

N – общее количество крыс в группе, абс. ед.

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные обрабатывали в программах «Excel», «GraphPad Prism 8» и «Statistica 12.0». В таблицах они представлены

в виде среднего и его стандартной ошибки ($M \pm m$). С целью определения значимости различий между данными до и после облучения применяли критерий Вилкоксона, для сравнения выборок — тест Манна-Уитни. Вероятность $p \leq 0,05$ считали достаточной для вывода о статистической значимости различий полученных данных.

Результаты и обсуждение

Оценка эффективности натриевой соли NAC и выбор его оптимальной радиозащитной дозы

Установлено, что введение препарата в дозе 500 мг/кг способствовало росту выживаемости на 17 % по сравнению со значениями показателя контрольной группы крыс, при этом СПЖ составила $9,7 \pm 2,7$ сут. Увеличение дозы препарата вдвое приводило к росту выживаемости крыс до 33 ± 14 % при СПЖ $8,6 \pm 3,9$ сут. Наиболее эффективной радиозащитной дозой натриевой соли NAC оказалось 2000 мг/кг, введение которой за 1 ч до облучения обеспечивало выживаемость 42 ± 14 % животных, при СПЖ $12,1 \pm 4,0$ сут (табл. 2).

Таблица 2. Оценка эффективности натриевой соли NAC при облучении крыс

[Table 2. Efficacy of sodium salt NAC for exposed rats]

Экспериментальная группа (доза препарата, мг/кг) [Experimental group (drug dose, mg/kg)]	Выживаемость, % [Survival, %]	СПЖ, сут. [Mean lifespan, day]
Контроль [Control]	0 ± 0	$10,3 \pm 0,7$
300	0 ± 0	$7,4 \pm 0,9$
500	17 ± 11	$9,7 \pm 2,7$
1000	$33 \pm 14^*$	$8,6 \pm 3,9$
2000	$42 \pm 14^*$	$12,1 \pm 4,0$

* – различия достоверны ($p \leq 0,05$) по сравнению с группой «Контроль»
[* – significant differences ($p \leq 0.05$) compared to the "Control" group].

Выявление радиозащитной эффективности натриевой соли NAC в различных схемах применения

Исследования, проведенные на экспериментальной модели костномозговой формы острого радиационного поражения тяжелой степени, показали, что в случае применения за 1 ч до облучения натриевая соль NAC увеличивала выживаемость крыс, облученных в дозе 7,0 Гр (ЛД_{95-100/30}) на 33 % и СПЖ на 2,5 сут ($с 7,9 \pm 0,7$ сут до $10,4 \pm 3,0$ сут) в сравнении с контрольной группой. Увеличение временного интервала до 3 ч между введением препарата и началом облучения не оказывало влияния на исследуемые показатели (табл. 3).

¹Приказ 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.)]

²Хельсинская декларация. Этические принципы проведения медицинских исследований с участием человека в качестве субъекта / Всемирная медицинская ассоциация; принята 18-й Генеральной ассамблеей ВМА, Хельсинки, Финляндия, июнь 1964 г.; изменения внесены 52-й Генеральной ассамблеей ВМА, Эдинбург, Шотландия, октябрь 2000 г [World Medical Association. Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. Adopted by the 18th WMA General Assembly, Helsinki, Finland, June 1964; amended by the 52nd WMA General Assembly, Edinburgh, Scotland, October 2000 (In Russ.)]

Таблица 3. Эффективность профилактического введения натриевой соли NAC у крыс на фоне облучения

[Table 3. Efficacy of prophylactic administration of sodium salt NAC for exposed rats]

Экспериментальная группа [Experimental group]	Количество животных, гол [Number of animals, heads]	Выживаемость, % [Survival, %]	СПЖ, сут [Mean lifespan, day]
Плацебо за 3 ч [Placebo –3 h]	12	8,3 ± 8,0	8,9 ± 2,3
Плацебо за 1 ч [Placebo –1 h]	12	0 ± 0	7,9 ± 0,7
Натриевая соль NAC за 3 ч [sodium salt NAC –3 h]	18	5,5 ± 5	9,3 ± 1,7
Натриевая соль NAC за 1 ч [sodium salt NAC –1 h]	18	33 ± 11*	10,4 ± 3,0

* –различия статистически значимы ($p \leq 0,05$) по сравнению с группой «Плацебо за 1 ч» [* –Statistically significant differences were observed versus the «Placebo administered 1 hour before» group ($p \leq 0,05$)].

Результаты исследования влияния натриевой соли NAC на значения гематологических показателей периферической крови крыс на 30 сут после облучения в дозе 7,0 Гр показали, что у животных, которым вводили препарат за 1 ч до облучения, количество лимфоцитов было в 1,6 раза ниже, чем в контроле, тогда как уровень моноцитов, нейтрофилов, эозинофилов и базофилов соответствовал таковому у интактных животных. Кроме того, у облученных животных наблюдалось снижение числа эритроцитов и тромбоцитов. Сходные изменения выявлены и в группе крыс, которым вводили препарат за 3 ч до облучения (табл. 4). Таким образом, профилактическое применение натриевой соли NAC не обеспечило в полной мере восстановление гемопозза у облученных животных, что проявлялось в наличии у них признаков лимфоцитопении, тромбоцитопении и угнетения эритропоэза.

Таблица 4. Значения гематологических показателей периферической крови крыс на 30 сутки после облучения в дозе 7,0 Гр при применении натриевой соли NAC в дозе 2500 мг/кг Me/Q1; Q3/

[Table 4. Values of hematological parameters of peripheral blood in rats on day 30 after of irradiation at a dose of 7.0 Gy with sodium salt NAC administration at 2500 mg/kg (Me/Q1; Q3)]

Экспериментальная группа, дозы и схема применения препарата [Experimental group: doses and administration regimen of the APS drug]	Значение гематологических показателей, абсолютное количество клеток (*10 ⁹ /л) [Value of hematological parameters: absolute cell count (*10 ⁹ /L)]							
	Лейкоциты [Leukocytes]	Лимфоциты [Lymphocytes]	Моноциты [Monocytes]	Нейтрофилы [Neutrophils]	Эозинофилы [Eosinophils]	Базофилы [Basophils]	Эритроциты [Erythrocytes]	Тромбоциты [Platelets]
Интактный контроль [Intact control]	10,46 /9,61;13,27/	6,32 /5,7;10,13/	1,74 /1,24;2,01/	2,10 /1,74;2,38/	0,22 /0,2;0,39/	0,01 /0,01;0,01/	4,96 /4,86;5,19/	400,5 /333,0;444,5/
Контроль (плацебо + облучение) [Control (placebo + irradiation)]*	–	–	–	–	–	–	–	–
Натриевая соль NAC 2500 мг/кг за 1 ч [sodium salt NAC 2500 mg/kg – 1 h]	8,21 /7,35;9,68/	3,94 /3,68;4,39/ *	1,77 /1,59;2,33/	2,18 /1,57;2,6/	0,40 /0,21;0,47/	0,01 /0,01;0,02/	4,06 /3,74;4,51/ *	31,0 /15,25;50,5/ *
Натриевая соль NAC 2500 мг/кг за 3 ч [sodium salt NAC 2500 mg/kg –3 h]	3,46 /3,46;3,46/	1,29 /1,29;1,29/	1,20 /1,20;1,20/	0,77 /0,77;0,77/	0,19 /0,19;0,19/	0,01 /0,01;0,01/	4,59 /4,59;4,59/	16,0 /16,0;16,0/

* в группе "Натриевая соль NAC 2500 мг/кг за 3 ч" представлены данные по 1(одному) животному. На 30 сут после воздействия в контрольной группе (плацебо + облучение) зафиксирована 100 % гибель животных [*in the "sodium salt NAC 2500 mg/kg –3 h" group, data are presented for one (single) animal. 100 % mortality was recorded in the control group (placebo + irradiation) on 30 day after exposure].

Оценка динамики содержания форменных элементов крови у облученных животных при применении натриевой соли NAC

Данные, полученные в ходе гематологических исследований периферической крови крыс на 7, 15 и 30 сутки после облучения в дозе 7,0 Гр при применении натриевой соли NAC в дозе 2500 мг/кг за 1 ч после воздействия, представлены на рисунке 1.

Исследование гематологических показателей на 7-е сутки после введения препарата в указанной дозе не выявило достоверных изменений по сравнению с интактной группой животных. У облучённых крыс, независимо от введения плацебо или NAC, отмечались выраженные лейкопения и тромбоцитопения. Вместе с тем, общее число лейкоцитов в группе с профилактическим применением натриевой соли NAC было почти в 2 раза выше, чем у контрольных облучённых животных. Уровень тромбоцитов у крыс, получавших натриевую соль NAC, был статистически значимо выше по сравнению с группой плацебо.

Исследование гематологических показателей периферической крови крыс на 15-е сутки после применения натриевой соли NAC и облучения не выявило достоверных отклонений оцениваемых параметров от значений, соответствующих физиологической норме (интактный контроль). Анализ крови крыс контрольной группы (плацебо + облучение) показал, что у них не произошло значимого изменения числа лейкоцитов, тогда как состояние тромбоцитопении стало еще более выраженным.

Вместе с тем у крыс (введение натриевой соли NAC в дозе 2500 мг/кг + облучение) зафиксировано увеличение числа лейкоцитов и, в первую очередь, лимфоцитов относительно данных, полученных на 7 сутки наблюдения. Сопоставление результатов анализа крови облученных крыс после введения плацебо и натриевой соли NAC показало, что в случае применения натриевой соли NAC на 15-е сутки наблюдения число лейкоцитов (в первую очередь лимфоцитов) и тромбоцитов было статистически значимо выше по сравнению с содержанием этих клеток в крови облученных животных с плацебо. Указанные результаты свидетельствуют, что профилактическое введение натриевой соли NAC способствовало более быстрому восстановлению гемопоэза у облученных животных.

На 30-е сутки наблюдения у крыс, которым за 1 час до облучения вводили натриевую соль NAC в дозе 2500 мг/кг, отмечено восстановление общего числа лейкоцитов практически до нормальных значений. Однако уровни лимфоцитов и тромбоцитов в этой группе оставались пониженными. Таким образом в экспериментах на крысах, облученных в дозе ЛД_{95-100/30} установлено, что применение натриевой соли NAC в дозе 2500 мг/кг способствовало сохранению клеточного пула гемопоэтической системы и обеспечивало ускорению процесса восстановления гемопоэза. Тем не менее, полного восстановления клеточного состава периферической крови не наблюдали даже к 30 суткам эксперимента.

Заключение

Проведённые исследования продемонстрировали, что внутрибрюшинное введение натриевой соли NAC в дозе 2500 мг/кг оказывало выраженный защитный эффект на гемопоэтическую систему крыс, подвергнутых

тотальному облучению в дозе 7,0 Гр. Препарат способствовал частичному сохранению клеточного пула костного мозга и ускорению восстановления гемопоэза.

Введение препарата в дозе 2000 мг/кг обеспечивало выживаемость облученных в смертельной дозе животных на 42 %. Применение препарата за 1 ч до облучения повышало выживаемость на 33 % и увеличивало СПЖ на 2,5 суток по сравнению с контрольной группой. При этом увеличение временного интервала до 3 ч между введением препарата и началом облучения не оказывало влияния на исследуемые показатели.

Полученные данные подтверждают перспективность дальнейшего изучения фармакодинамических и радиозащитных свойств натриевой соли NAC, которая рассматривается как потенциальное средство профилактики и терапии лучевых поражений.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

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

Майстренко Д.Н. – общее руководство исследованием, формулировка цели и задач работы, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Евтушенко В.И. – разработка методики приготовления препарата, анализ результатов исследования.

Станжевский А.А. – обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

Николаев Д.Н. – проведение экспериментальных исследований, мониторинг состояния животных, проведение расчетов.

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

Виноградова Ю.Н. – анализ результатов исследования.

Иоффе Е.Б. – поиск и анализ литературы, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

Майстренко А.Д. – анализ, обработка и интерпретация результатов исследования.

Благодарности

Авторы выражают особую благодарность коллективу Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Министерства обороны Российской Федерации за оказанную помощь при проведении данного исследования.

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 I-аминокислотами».

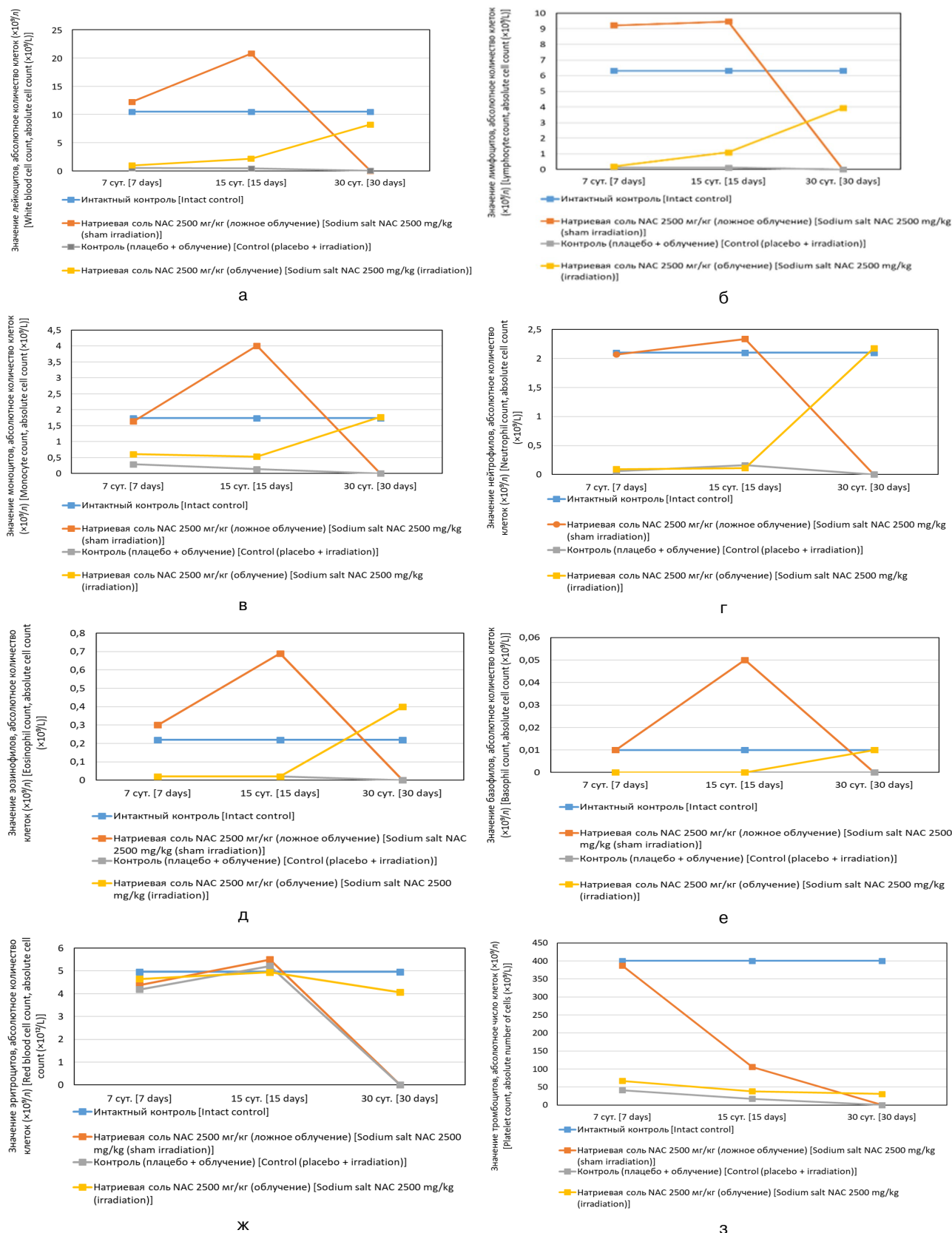


Рис. Значения гематологических показателей периферической крови крыс на 7, 15 и 30 сутки после облучения в дозе 7,0 Гр при применении натриевой соли NAC в различных дозах за 1 ч до облучения: а – лейкоциты; б – лимфоциты; в – моноциты; г – нейтрофилы; д – эозинофилы; е – базофилы; ж – эритроциты; з – тромбоциты

[Fig. Hematological parameters of rats' peripheral blood on days 7, 15, and 30 after irradiation at a dose of 7.0 Gy, with sodium salt NAC at various doses 1 hour before exposure: а – leukocytes; б – lymphocytes; в – monocytes; г – neutrophils; д – eosinophils; е – basophils; ж – erythrocytes; з – platelets]

Литература

1. Дыхов О.В., Прокопович Д.А. Медицинские средства противорадиационной защиты: учеб.-метод. пособие. Гомель: ГомГМУ, 2018. 48 с.
2. Риттер Г.С. Изучение клеточных и молекулярных механизмов радиопротекторного действия двуцепочечной РНК *Saccharomyces cerevisiae*: дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск: ИЦиГ СО РАН, 2024.
3. Зиновьева Г.А. Радиационные поражения нервной системы. Часть IV. Классификация средств профилактики лучевых поражений // Клиническая неврология. 2008. № 4. С. 44–49. EDN MBHWP.
4. Yılmaz H., Mercantepe F., Tumkaya L. et al. The potential antioxidant effect of N-acetylcysteine on X-ray ionizing radiation-induced pancreas islet cell toxicity // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2023. Vol. 685. P. 149–154. DOI: 10.1016/j.bbrc.2023.149154.
5. Kim H.J., Kang S.U., Lee Y.S. et al. Protective effects of N-acetylcysteine against radiation-induced oral mucositis in vitro and in vivo // Cancer Research and Treatment. 2020. Vol. 52. P. 1019–1030. DOI: 10.4143/crt.2020.012.
6. Mercantepe T., Topcu A., Rakici S. et al. The radioprotective effect of N-acetylcysteine against X-radiation-induced renal injury in rats // Environmental Science and Pollution Research International. 2019. Vol. 26. P. 29085–29094. DOI: 10.1007/s11356-019-06110-0.
7. Li Y.-L., Gang W., Bo-Wen W. et al. The potential treatment of N-acetylcysteine as an antioxidant in the radiation-induced heart disease // Cardiovascular Diagnosis and Therapy. 2024. Vol. 14, № 4. P. 509–524. DOI: 10.21037/cdt-24-19.
8. Demirel C., Kılıksiz S., Ay O.I. et al. Effect of N-acetylcysteine on radiation-induced genotoxicity and cytotoxicity in rat bone marrow // Journal of Radiation Research. 2009. Vol. 50, № 1. P. 43–50. DOI: 10.1269/jrr.08066.
9. Tascilar O., Çakmak G.K., Emre A.U. et al. N-acetylcysteine attenuates the deleterious effects of radiation therapy on incisional wound healing in rats // Hippokratia. 2014. Vol. 18, № 1. P. 17–23.
10. Mercantepe F., Topcu A., Rakici S. et al. The effects of N-acetylcysteine on radiotherapy-induced small intestinal damage in rats // Experimental Biology and Medicine (Maywood). 2019. Vol. 244, № 5. P. 372–379. DOI: 10.1177/1535370219831225.
11. Филиал НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ — ПЛЖ «Рапполово»: официальный сайт. URL: <https://rappolovo.org/> (Дата обращения: 09.11.2025).
12. Auerbach E., Bocksell J., Lovel A.L. et al. FELASA recommendations on the transfer of animals used for scientific and educational purposes // Laboratory Animals. 2023. Vol. 57, No. 5. P. 572–582. DOI: 10.1177/00236772231158863.
13. Гематологический анализатор URIT-5160 / ООО «Мед Куб». URL: https://medcub.ru/catalog/laboratornoe_obo_rudovanie/gematologicheskie_analizatory/gematologicheskiy_analizator_urit_5160/?ysclid=mnws8zhq4w616897147 (Дата обращения: 10.04.2026).

Поступила: 14.04.2026

Попова Алена Александровна – научный сотрудник лаборатории генной инженерии Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации. Адрес для переписки: 197758, Санкт-Петербург, пос. Песочный, Ленинградская ул., д. 70; E-mail: aa_porova@rrcrst.ru; ORCID: 0000-0001-8077-9832, РИНЦ Author ID: 1066082

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, РИНЦ Author ID: 859729

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, РИНЦ Author ID: 661060

Евтушенко Владимир Иванович – доктор биологических наук, руководитель лаборатории генной инженерии Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0008-9070-9481, РИНЦ Author ID: 81680

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, РИНЦ Author ID: 199418

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, РИНЦ Author ID: 201354

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, РИНЦ Author ID: 1175338

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, РИНЦ Author ID: 288560

Июффе Екатерина Борисовна – ординатор второго 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

Майстренко Алексей Дмитриевич – кандидат медицинских наук, врач, сердечно-сосудистый хирург отделения консультативно-диагностического центра главного клинического корпуса Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0003-0335-4712, РИНЦ Author ID: 711488

Для цитирования: Попова А.А., Чипига Л.А., Майстренко Д.Н., Евтушенко В.И., Станжевский А.А., Николаев Д.Н., Понежа Т.Е., Виноградова Ю.Н., Иоффе Е.Б., Майстренко А.Д. Оценка радиопротекторной эффективности водорастворимой натриевой соли n-ацетилцистеина в экспериментальных исследованиях // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 18–26. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-18-26

Evaluation of the radioprotective efficacy of water-soluble sodium salt of n-acetylcysteine in experimental studies

Alena A. Popova¹, Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Dmitriy N. Maystrenko¹, Vladimir I. Evtushenko¹, Andrey A. Stanzhevskiy¹, Dmitriy N. Nikolaev¹, Tamara E. Ponezha¹, Yuliia N. Vinogradova¹, Ekaterina B. Ioffe¹, Alexey D. Maistrenko³

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

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

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

Although several radioprotectors have been developed, their clinical use remains limited due to toxicity, a narrow therapeutic window, and reduced efficacy when administered post irradiation. Consequently, there is a pressing need to develop novel radioprotective agents with improved safety and effectiveness. The aim of this study was to evaluate the radioprotective efficacy of water-soluble sodium salt n-acetylcysteine (NAC). Materials and Methods: The study was conducted on 252 male Wistar rats to determine the radioprotective dose of sodium n-acetylcysteine, assess the effectiveness of its prophylactic administration prior to gamma irradiation, and analyze the dynamics of hematological parameters in peripheral blood. The drug was administered intraperitoneally 1 or 3 hours before irradiation, or 1 hour after exposure. Irradiation was performed using an IGUR-1 device at a dose of 7.0 Gy ($LD_{95-100/30}$). The working solution of sodium n-acetylcysteine (300 mg/mL, pH 7.5) was prepared ex tempore by dissolving 3 g of the dry substance in 3 mL of distilled water, followed by the addition of 3.5 mL of 5N NaOH and titration to the required pH. Results and Discussion: Intraperitoneal administration of sodium n-acetylcysteine at a dose of 2500 mg/kg contributed to partial preservation of hematopoiesis in animals exposed to 7.0 Gy ($LD_{95-100/30}$), promoted maintenance of the hematopoietic cell pool, and accelerated the recovery process. Evaluation of the specific radioprotective activity showed that administration at a dose of 2000 mg/kg provided 42 % survival in animals exposed to a lethal radiation dose. Conclusion: The findings in rats demonstrate the rationale for further investigation of the pharmacodynamic properties of sodium n-acetylcysteine, highlighting its significant potential as a radioprotective agent.

Key words: sodium salt n-acetylcysteine, radioprotectors, radiation injury, Wistar rats, irradiation, average lifespan, lethality.

Authors' personal contribution

Popova A.A. – study design development, organization and conduction of experimental studies, animal health monitoring, literature search and analysis, data processing and analysis, interpretation and discussion of results, manuscript writing and editing.

Chipiga L.A. – scientific supervision of the study, data processing and analysis, interpretation and discussion of results, manuscript editing.

Maystrenko D.N. – overall supervision of the study, formulation of the study aim and objectives, analysis and interpretation of results, discussion of findings.

Evtushenko V.I. – development of the drug preparation protocol, analysis of research results.

Stanzhevskiy A.A. – discussion of results, manuscript editing.

Nikolaev D.N. – conduction of experimental studies, animal

health monitoring, performance of calculations.

Ponezha T.E. – performance of irradiation procedures, control of irradiation parameters, processing of technical data.

Vinogradova Yu.N. – analysis of research results.

Ioffe E.B. – literature search and analysis, manuscript editing.

Maistrenko A.D. – analysis, processing, and interpretation of research data.

Acknowledgements

The authors express special gratitude to the staff of the Federal State Budgetary Institution "State Research Testing Institute of Military Medicine" of the Ministry of Defence of the Russian Federation for their assistance in conducting this study.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interest.

Alena A. Popova

A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies

Address for correspondence: 70, Leningradskaya Str., Pesochny settlement, Saint Petersburg, 197758, Russia; E-mail: aa_popova@rrcrst.ru

Sources of funding

The work was performed as a part of state research program "Development of radioprotector based on water-soluble forms of nanocarbon modified with l-amino acids".

References

1. Dokhov OV, Prokopovich DA. Medical means of radioprotection: study guide. Gomel: Gomel State Medical University; 2018. 48 p.
2. Ritter GS. Study of cellular and molecular mechanisms of the radioprotective effect of double-stranded RNA of *Saccharomyces cerevisiae*: dissertation ... Candidate of Biological Sciences. Novosibirsk: Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2024.
3. Zinovieva GA. Radiation injuries of the nervous system. Part IV. Classification of prophylactic agents for radiation injuries. *Clinical Neurology*. 2008;4: 44–49.
4. Yilmaz H, Mercantepe F, Tumkaya L, Unal D, Yildirim M, Topcu A, et al. The potential antioxidant effect of N-acetylcysteine on X-ray ionizing radiation-induced pancreas islet cell toxicity. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2023;685: 149–154. DOI: 10.1016/j.bbrc.2023.149154.
5. Kim HJ, Kang SU, Lee YS, Shin YS, Kim CH, Kim JE, et al. Protective effects of N-acetylcysteine against radiation-induced oral mucositis in vitro and in vivo. *Cancer Research and Treatment*. 2020;52: 1019–1030. DOI: 10.4143/crt.2020.012.
6. Mercantepe T, Topcu A, Rakici S, Yildirim M, Unal D, Tumkaya L, et al. The radioprotective effect of N-acetylcysteine against X-radiation-induced renal injury in rats. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2019;26: 29085–29094. DOI: 10.1007/s11356-019-06110-0.
7. Li Y-L, Gang W, Bo-Wen W, Xin-Yu L, Jia-Xin Z, Yi-Xuan Z, et al. The potential treatment of N-acetylcysteine as an antioxidant in the radiation-induced heart disease. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2024;14(4): 509–524. DOI: 10.21037/cdt-24-19.
8. Demirel C, Kılıksız S, Ay OI, Hayırlıoğlu H, Erdem O, Gürbüz F, et al. Effect of N-acetylcysteine on radiation-induced genotoxicity and cytotoxicity in rat bone marrow. *Journal of Radiation Research*. 2009;50(1): 43–50. DOI: 10.1269/jrr.08066.
9. Tascilar O, Çakmak GK, Emre AU, Bakkal H, Kandemir N, Turkcu UO, et al. N-acetylcysteine attenuates the deleterious effects of radiation therapy on incisional wound healing in rats. *Hippokratia*. 2014;18(1): 17–23.
10. Mercantepe F, Topcu A, Rakici S, Yildirim M, Unal D, Tumkaya L, et al. The effects of N-acetylcysteine on radiotherapy-induced small intestinal damage in rats. *Experimental Biology and Medicine (Maywood)*. 2019;244(5): 372–379. DOI: 10.1177/1535370219831225.
11. Branch of the National Research Centre "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute — Laboratory Animal Facility "Rapolovo": official website. Available from: <https://rappolovo.org/> [Accessed 09.11.2025].
12. Auerbach E, Bocksell J, Lovel AL, Adams A, Barton P, Brinkworth M, et al. FELASA recommendations on the transfer of animals used for scientific and educational purposes. *Laboratory Animals*. 2023;57(5): 572–582. DOI:10.1177/00236772231158863.
13. URIT-5160 Hematology Analyzer [Electronic resource] / LLC "MedKub". Available from: https://medcub.ru/catalog/laboratornoe_oborudovanie/gematologicheskie_analizatory/gematologicheskii_analizator_urit_5160/?ysclid=mnws8zhq4w616897147 [Accessed 10.04.2026].

Received: April 14, 2026

For correspondence: Alena A. Popova – Researcher at the Genetic Engineering Laboratory, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation (70, Leningradskaya Str., Pesochny settlement, Saint Petersburg, 197758, Russia; E-mail: aa_popova@rrcrst.ru); ORCID: 0000-0001-8077-9832, RSCI Author ID: 1066082

Larisa A. Chipiga – Candidate of Technical 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, RSCI Author ID: 859729

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, РИНЦ ID 661060

Vladimir I. Evtushenko – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Genetic Engineering, Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies named after Academician A.M. Granov, Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0008-9070-9481, RSCI Author ID: 81680

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, RSCI Author ID: 199418

Dmitriy N. Nikolaev – Candidate 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, RSCI Author ID: 201354

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, RSCI Author ID: 1175338

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, RSCI Author ID: 288560

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

Alexey D. Maistrenko – Candidate of Medical Sciences, Cardiovascular Surgeon at the Consultative and Diagnostic Center of the Regional Clinical Hospital, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0003-0335-4712, RSCI Author ID: 711488

For citation: Popova A.A., Chipiga L.A., Maystrenko D.N., Evtushenko V.I., Stanzhevskiy A.A., Nikolaev D.N., Ponezha T.E., Vinogradova Yu.N., Ioffe E.B., Maistrenko A.D. Evaluation of the radioprotective efficacy of water-soluble sodium salt of n-acetylcysteine in experimental studies. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 18–26. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-18-26

Влияние метилирования и транскрипционной активности генов редокс-системы на клеточную гибель лимфоцитов крови у хронически облучённых лиц

Киселев О.С.^{1,2}, Блинова Е.А.^{1,2}, Аклеев А.В.^{1,2}

¹ Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики
Федерального медико-биологического агентства, Озёрск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

*Хроническое радиационное воздействие может вызывать стойкие эпигенетические изменения, влияющие на механизмы клеточной гибели и развитие отдалённых биологических эффектов. Роль метилирования генов редокс-системы в регуляции апоптоза и некроза лимфоцитов у хронически облучённых лиц остаётся недостаточно изученной. Цель исследования — оценить связь метилирования промоторных регионов и транскрипционной активности генов редокс-системы с интенсивностью апоптоза и некроза лимфоцитов периферической крови у хронически облучённых лиц. Материалы и методы: В исследование включён 171 человек: 99 лиц, подвергшихся хроническому низкоинтенсивному радиационному воздействию, и 72 человека группы сравнения, проживавших в сходных социально-бытовых условиях. Апоптоз и некроз лимфоцитов периферической крови оценивали методом проточной цитометрии. Молекулярный анализ включал оценку метилирования CpG-динуклеотидов в промоторных регионах генов редокс-системы и определение их транскрипционной активности. Результаты исследования и обсуждение: У облучённых лиц выявлено статистически значимое повышение уровня некроза лимфоцитов по сравнению с группой сравнения ($p=0,033$). Некроз положительно коррелировал с дозами облучения красного костного мозга ($p=0,24$; $p=0,001$), тимуса и периферических лимфоидных органов ($p=0,19$; $p=0,013$). При анализе апоптоза были выявлены статистически значимые положительные корреляционные связи с уровнем метилирования генов *SOD2* ($p=0,18$; $p=0,017$), *GPX1* ($p=0,26$; $p=0,001$), *GSTP1* ($p=0,22$; $p=0,004$), *MPO* ($p=0,41$; $p<0,0001$) и *CAT* ($p=0,21$; $p=0,006$). По данным множественного регрессионного анализа, апоптоз ассоциирован с метилированием *GSTP1* и *MPO*. Заключение: Таким образом, у хронически облучённых лиц в отдалённые сроки после воздействия некротическая гибель лимфоцитов ассоциирована преимущественно с дозой облучения, тогда как апоптоз связан с гиперметилированием промоторных регионов генов редокс-системы.*

Ключевые слова: хроническое радиационное воздействие; лимфоциты периферической крови, апоптоз, некроз, редокс-система, метилирование ДНК, транскрипционная активность, гены антиоксидантной системы.

Введение

Ионизирующее излучение (ИИ) является фактором, способным вызывать не только прямые повреждения ДНК, но и долговременные изменения клеточной регуляции, затрагивающие процессы репарации, апоптоза, некроза, окислительно-восстановительного гомеостаза и эпигенетического контроля экспрессии генов [1–4]. Особое значение имеет изучение отдалённых эффектов хронического низкоинтенсивного радиационного воздействия, поскольку клеточный ответ в этих условиях формируется не как результат одномоментного повреждения, а как следствие длительной перестройки регуляторных систем организма. Такая проблема актуальна для жителей прибрежных сёл реки Течи, подвергшихся хроническому радиационному воздействию вследствие сбросов жидких радиоактивных отходов в 1949–1956 гг. [5–7].

Ранее у хронически облучённых жителей прибрежных сёл реки Течи уже были проведены исследования показателей апоптотической гибели лимфоцитов периферической крови. Было показано, что в отдалённые сроки после начала

облучения у облучённых лиц регистрировались изменения отдельных показателей апоптоза и иммунного ответа, включая повышение содержания сывороточного ФНО α [10]. В последующих работах установлено, что повышенная интенсивность апоптоза лимфоцитов не приводила к развитию выраженного вторичного иммунодефицита, однако сопровождалась изменениями отдельных показателей врождённого иммунитета [11]. Кроме того, была показана связь частоты апоптотической гибели лимфоцитов с полиморфными вариантами генов регуляции апоптоза, в частности *BAX*, что указывает на возможный вклад генетических факторов в индивидуальную радиочувствительность [12].

На молекулярном уровне у хронически облучённых лиц с различной интенсивностью раннего апоптоза, позднего апоптоза и некроза изучалась транскрипционная активность генов репарации, клеточного цикла и апоптоза. Было выявлено, что повышенная интенсивность раннего апоптоза ассоциирована с увеличением относительного содержания мРНК *PAD14*, позднего апоптоза — с изменением транскрипционной активности *TP53* и *BCL-2*, а некроза — с повышением транскрипционной активности *TP53* [13]. Эти данные

Киселев Олег Сергеевич

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail:

kiselevoleg230@gmail.com

свидетельствуют о том, что различные варианты клеточной гибели у хронически облучённых лиц могут сопровождаться специфическими изменениями экспрессии генов, участвующих в поддержании клеточного гомеостаза.

Важным механизмом регуляции экспрессии генов является метилирование ДНК. Метилирование CpG-динуклеотидов промоторных регионов может изменять транскрипционную активность генов и тем самым влиять на реализацию клеточных процессов, включая апоптоз [14–16]. У лиц, подвергшихся хроническому радиационному воздействию, ранее были выявлены изменения метилирования промоторных регионов генов апоптоза *BCL2*, *ATM*, *TP53* и *MDM2*, а также показана связь метилирования отдельных генов с интенсивностью клеточной гибели лимфоцитов [14, 17]. Таким образом, накопленные данные свидетельствуют о значении генетических, транскрипционных и эпигенетических механизмов в регуляции апоптоза и некроза у хронически облучённых лиц.

Вместе с тем большинство ранее выполненных исследований было сосредоточено на генах апоптоза, репарации ДНК и клеточного цикла. Менее изученным остаётся вклад генов редокс-системы, однако окислительно-восстановительный статус клетки является одним из центральных звеньев радиационного ответа. ИИ сопровождается образованием активных форм кислорода, которые могут повреждать ДНК, белки и липиды, а также участвовать в регуляции апоптоза, некроза, воспаления и адаптационных реакциях [18–20]. В этих условиях состояние антиоксидантной и прооксидантной систем может определять направление клеточного ответа – сохранение жизнеспособности, запуск апоптоза или переход к гибели по некротическому пути.

Гены *SOD1*, *SOD2*, *CAT*, *GPX1*, *GSTP1*, *CYBA*, *MPO* и другие участвуют в образовании, нейтрализации и метаболизме активных форм кислорода. Изменение метилирования их промоторных регионов и транскрипционной активности может быть одним из механизмов, связывающих хроническое радиационное воздействие, окислительный стресс и клеточную гибель. Ранее было показано, что у хронически облучённых лиц уровень метилирования промоторного региона *GPX1* статистически значимо отличается от группы сравнения и связан с дозой облучения красного костного мозга [21]. Однако остаётся неясным, связаны ли метилирование и транскрипционная активность генов редокс-системы с интенсивностью апоптоза и некроза лимфоцитов.

Таким образом, актуальным является изучение роли генов редокс-системы в регуляции клеточной гибели у лиц, подвергшихся хроническому радиационному воздействию.

Цель исследования – оценка связи метилирования промоторных регионов и транскрипционной активности генов редокс-системы с интенсивностью апоптоза и некроза лимфоцитов периферической крови у хронически облучённых лиц в отдалённые сроки после начала воздействия.

Материалы и методы

Описание группы обследованных лиц

В исследование включён 171 человек, относящийся к Уральской когорте аварийно-облучённого населения и группе сравнения. Исследование проводилось в отдалённые сроки после начала хронического радиационного воздействия – спустя более 60 лет. В качестве биологического материала использовали лимфоциты периферической крови.

Основную группу составили 99 человек, подвергшихся хроническому низкоинтенсивному радиационному воздействию (медианное значение накопленной дозы красного костного мозга (ККМ) – 568,5 (73,5–3715,5) мГр). Группа сравнения включала 72 человека, проживавших в сходных социально-бытовых условиях с накопленной дозой облучения ККМ менее 70 мГр. Характеристика облучённых лиц и группы сравнения представлена в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика обследованных лиц
[Table 1. Characteristics of the studied groups]

Характеристика группы [Characteristics of the group]	Группа сравнения [Comparison group] (N=72)	Облучённые лица [Exposed individuals] (N=99)
Возраст на момент обследования, лет [Age at the time of examination, years] ¹	66,3 ± 0,8 (56–87)	72,3 ± 0,6 (62–94)
Пол, количество (%) [Sex, persons (%)]		
Мужчины [Men]	27 (37,5 %)	35 (35,4 %)
Женщины [Women]	45 (62,5 %)	64 (64,6 %)
Этническая принадлежность, количество (%) [Ethnicity, persons (%)]		
Славяне [Slavs]	37 (51,4 %)	45 (45,5 %)
Тюрки [Turkic peoples]	35 (48,6 %)	54 (54,5 %)
Поглощённая доза облучения [Absorbed dose]		
Поглощённая доза облучения красного костного мозга (ККМ), мГр [Absorbed dose to red bone marrow (RBM), mGy] ²	11,3 (0–56,1)	568,5 (73,5–3715,5)
Поглощённая доза тимуса и периферических лимфоидных органов, мГр [Absorbed dose of thymus and peripheral lymphoid organs, mGy] ²	3,4 (0–39,4)	59,2 (2,0–488,8)

¹ Среднее значение ± ошибка среднего (мин.–макс.) [Mean ± standard error (min–max)].

² Медиана (минимум–максимум) [Median (min–max)].

Индивидуальные дозы облучения были реконструированы с использованием дозиметрической системы TRDS-2016 [22]. Для каждого обследованного учитывали накопленную дозу облучения ККМ, а также дозу облучения тимуса и периферических органов иммунной системы.

При формировании выборки учитывали возраст, пол и этническую принадлежность обследованных лиц, поскольку эти факторы могут влиять на интенсивность клеточной гибели лимфоцитов и должны рассматриваться как потенциальные модифицирующие переменные при статистическом анализе.

Таким образом, исследуемая выборка представляет собой группу лиц пожилого возраста, обследованных в отдалённый период после хронического радиационного воздействия, с документированными индивидуальными дозами облучения ККМ, тимуса и периферических лимфоидных органов.

Методы исследования

Для оценки апоптотической и некротической гибели лимфоцитов периферической крови венозную кровь забирали из локтевой вены в объёме 6 мл в вакуумные пробирки типа Vacuette с Li-гепарином (Improvacuter, Китай). Лейкоцитарную фракцию выделяли из цельной крови методом центрифугирования в градиенте плотности фиколл-урографина 1,077–1,078 г/см³ по стандартной методике.

Апоптотическую и некротическую гибель лимфоцитов периферической крови оценивали методом проточной цитометрии с применением окрашивания Annexin V-FITC/PI, как описано ранее [13, 14]. Результаты представляли в виде процента соответствующей клеточной популяции от общего числа проанализированных лимфоцитов.

Уровень метилирования промоторных регионов генов редокс-системы оценивали в образцах геномной ДНК, выделенной из периферической крови. После бисульфитной модификации ДНК проводили метилспецифичную ПЦР с последующим анализом кривых плавления высокого разрешения (MS-PCR-HRM), по ранее описанной методике [21]. Количественную оценку метилирования выполняли с использованием калибровочных стандартов с известным соотношением метилированной и неметилированной ДНК; процент метилирования рассчитывали по калибровочным кривым.

Транскрипционную активность генов редокс-системы определяли методом количественной ПЦР в реальном времени после выделения суммарной РНК из периферической крови и синтеза кДНК. Относительное содержание мРНК исследуемых генов рассчитывали с использованием сравнительного Ct-подхода по методу Ливака. Каждый образец анализировали в трёх технических повторях; результаты представляли в виде относительного уровня транскрипционной активности.

Статистическая обработка данных

Статистический анализ проводили с использованием пакета Statistica. Проверка на нормальность распределения осуществлялась с помощью критерия Шапиро–Уилка. При отклонении от нормального распределения количественные данные представляли в виде медианы и межквартильного размаха – Me (Q1–Q3). Возраст обследованных лиц описывали как $M \pm SE$ (min–max), дозовые показатели – как Me (min–max).

Для сравнения двух независимых групп применяли U-критерий Манна–Уитни. Корреляционные взаимосвязи оценивали с помощью рангового коэффициента Спирмена.

Вклад дозиметрических, клинко-демографических и молекулярных факторов (возраст, пол, этническая принадлежность, накопленная доза облучения ККМ, дозы на тимус и периферические лимфоидные органы, уровень метилирования и транскрипционной активности генов редокс-системы) в вариabельность показателей некроза, раннего и позднего апоптоза определяли методом множественного регрессионного анализа.

Критический уровень статистической значимости принимали равным $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Оценка клеточной гибели лимфоцитов периферической крови у обследованных лиц

Согласно результатам исследования, представленным в таблице 2, у облучённых людей медианный уровень некроза оказался выше, чем у лиц группы сравнения ($p=0,033$), в то время как по показателям апоптоза различий не обнаружено.

Таблица 2. Оценка клеточной гибели лимфоцитов периферической крови у обследованных лиц

[Table 2. Assessment of peripheral blood lymphocyte death in the studied groups]

Показатель [Parameter]	Группа сравнения [Comparison group], N=72	Облучённые лица [Exposed individuals], N=99	Значение p [p-value]
Некроз, % [Necrosis, %]	0,02 (0,01–0,05) ¹	0,03 (0,01–0,09) ¹	0,033
Апоптоз, % [Apoptosis, %]	3,72 (1,12–7,85) ¹	3,52 (0,75–9,46) ¹	0,95

¹Me (Q1–Q3) – медиана и межквартильный размах [Me (Q1–Q3) — median and interquartile range]

Для оценки связи фенотипов клеточной гибели с дозовыми и демографическими факторами использовался ранговый коэффициент Спирмена. В таблице 3 приведены коэффициенты корреляции (ρ) и уровни значимости (p). Анализ показал, что некротическая гибель лимфоцитов положительно ассоциирована с накопленной дозой облучения ККМ ($\rho=0,24$; $p=0,001$) и дозой облучения тимуса и периферических лимфоидных органов ($\rho=0,19$; $p=0,013$). Для апоптоза достоверных связей с дозовыми характеристиками выявлено не было. Пол показал слабую отрицательные корреляции с апоптозом ($\rho=-0,15$; $p=0,048$), что отражает большую выраженность апоптоза у женщин.

Таблица 3. Корреляции фенотипов клеточной гибели с дозовыми и демографическими факторами

[Table 3. Correlations of cell death phenotypes with dose and demographic factors]

Показатель [Parameter]	Доза ККМ [Dose to red bone marrow]	Доза тимуса и периферических лимфоидных органов [Dose of thymus and peripheral lymphoid organs]	Возраст [Age]	Пол [Sex]	Этнос [Ethnicity]
Некроз, % [Necrosis, %]	$\rho = 0,24$; $p = 0,001$	$\rho = 0,19$; $p = 0,013$	$\rho = 0,19$; $p = 0,013$	$\rho = 0,02$; $p = 0,84$	$\rho = 0,02$; $p = 0,8$
Апоптоз, % [Apoptosis, %]	$\rho = -0,02$; $p = 0,77$	$\rho = -0,06$; $p = 0,57$	$\rho = -0,14$; $p = 0,067$	$\rho = -0,15$; $p = 0,048$	$\rho = -0,03$; $p = 0,68$

ρ – коэффициент ранговой корреляции Спирмена [Spearman's rank correlation coefficient]

Для оценки возможных корреляций клеточной гибели лимфоцитов с молекулярными характеристиками редокс-системы в анализ были включены ранее полученные нами данные об уровне метилирования промоторных регионов генов *SOD2*, *GPX1*, *GSTP1*, *MPO*, *CAT*, *CYBA*, а также данные о транскрипционной активности генов *CYBA*, *SOD2*, *CAT*, *GPX1*, *GSTP1* [19, 20]. Некроз демонстрировал лишь тенденцию к отрицательной ассоциации с метилированием *GPX1* ($p=-0,15$; $p=0,057$) и *GSTP1* ($p=-0,14$; $p=0,071$), однако статистически значимых связей с показателями метилирования и транскрипционной активности генов редокс-системы выявлено не было. При анализе апоптоза были выявлены статистически значимые положительные корреляционные связи с уровнем метилирования генов *SOD2* ($p=0,18$; $p=0,017$), *GPX1* ($p=0,26$; $p=0,001$), *GSTP1* ($p=0,22$; $p=0,004$), *MPO* ($p=0,41$; $p<0,0001$) и *CAT* ($p=0,21$; $p=0,006$). Наиболее выраженная ассоциация наблюдалась для метилирования *MPO*. Транскрипционная активность генов редокс-системы оказалась связана лишь с апоптозом: уровень апоптоза отрицательно коррелировали с экспрессией *GPX1* ($p=-0,20$; $p=0,009$), что может отражать компенсаторное снижение активности антиоксидантной системы при усилении апоптоза.

Многофакторный регрессионный анализ влияния радиационных и нерадиационных факторов на клеточную гибель

Для уточнения вклада дозовых, клинко-демографических и молекулярных факторов в формирование фенотипа клеточной гибели лимфоцитов был проведён множественный линейный регрессионный анализ. В качестве зависимых переменных последовательно рассматривали показатели некроза и апоптоза лимфоцитов периферической крови. В качестве независимых переменных в модели включали возраст, пол, этническую принадлежность, поглощённые дозы облучения ККМ, тимуса и периферических лимфоидных органов, а также ранее полученные нами показатели метилирования и транскрипционной активности генов редокс-системы [19, 20]. Перед построением моделей независимые переменные стандартизовали с использованием z-преобразования.

В таблице 4 представлены только статистически значимые предикторы, сохранявшие самостоятельную ассоциацию с показателями клеточной гибели при одновременном учёте остальных факторов.

Таблица 4. Многофакторный регрессионный анализ факторов, ассоциированных с фенотипами клеточной гибели лимфоцитов периферической крови¹

[Table 4. Multivariable regression analysis of factors associated with peripheral blood lymphocyte death phenotypes]¹

Зависимая переменная [Dependent variable]	Параметры модели [Model parameters]	Значимые предикторы [Significant predictors]	β	p
Некроз [Necrosis]	$R^2 = 0,075$; $F = 0,76$; $p = 0,72$	Не выявлены [Not detected]	–	–
Ранний апоптоз [Early apoptosis]	$R^2 = 0,252$; $F = 3,18$; $p = 0,001$	Метилирование <i>GSTP1</i> [methylation <i>GSTP1</i>]	0,857	0,04
		Метилирование <i>MPO</i> [methylation <i>MPO</i>]	1,770	0,001

¹ β – стандартизованный коэффициент регрессии, R^2 – коэффициент детерминации, F-статистика критерия Фишера [β – standardized regression coefficient, R^2 – coefficient of determination, Fisher's F-statistic]

По результатам многофакторного анализа для некроза не было выявлено независимых статистически значимых предикторов. Несмотря на наличие положительных корреляций некроза с дозами облучения ККМ, тимуса и периферических лимфоидных органов, после одновременного учёта клинко-демографических и молекулярных факторов эти связи не сохраняли самостоятельной статистической значимости. Это позволяет предположить, что некротическая гибель лимфоцитов в отдалённый период хронического облучения имеет многофакторную природу и не определяется изолированным влиянием одного из включённых в модель показателей.

Наиболее информативной оказалась модель апоптоза, объяснявшая около 25 % вариабельности данного показателя. Независимыми предикторами апоптоза были уровни метилирования CpG динуклеотидов в промоторных областях генов *GSTP1* и *MPO*. Положительные коэффициенты регрессии свидетельствуют о том, что повышение метилирования этих генов ассоциировано с увеличением доли апоптотических лимфоцитов. Эти данные согласуются с результатами корреляционного анализа и указывают на возможную роль эпигенетической регуляции генов редокс-системы в формировании апоптотического фенотипа клеточной гибели.

Гиперметилирование *GSTP1* приводит к снижению экс-

прессии глутатион-S-трансферазы P1 – ключевого фермента антиоксидантной защиты, который инактивирует продукты перекисного окисления липидов и ксенобиотики. Уменьшение активности *GSTP1* может способствовать накоплению окислительного стресса и повышению чувствительности клеток к апоптозу.

Аналогично, хотя *MPO* традиционно считается прооксидантным ферментом, в лимфоцитах она выполняет защитную функцию. Согласно Cosic-Mujkanovic *et al.* (2023), *MPO* способна ингибировать апоптоз, активируя пути выживания (фосфорилирование AKT и ERK). Okada *et al.* (2016) показали, что в человеческих В- и Т-лимфоцитах *MPO* локализуется преимущественно в ядре и перинуклеарной области, что предполагает её участие в альтернативных, антиапоптотических механизмах. Таким образом, гиперметилирование *MPO* вероятно приводит к утрате этой протективной активности и усиливает апоптоз лимфоцитов [23, 24].

Заключение

В отдалённый период после хронического низкоинтенсивного радиационного воздействия у облучённых лиц выявлено статистически значимое повышение уровня некроза лимфоцитов периферической крови по сравнению с груп-

пой сравнения. Кроме того, некроз положительно коррелировал с накопленной дозой облучения ККМ и дозой облучения тимуса и периферических лимфоидных органов, что позволяет рассматривать его как один из отдалённых клеточных эффектов хронического облучения.

Хотя не отмечено зависимостей апоптоза от дозы облучения ККМ, а также тимуса и периферических лимфоидных органов, апоптотическая гибель лимфоцитов ассоциировалась с эпигенетическими параметрами генов редокс-системы: с уровнем метилированием CpG динуклеотидов в промоторной области генов *GSTP1* и *MPO*.

Полученные данные свидетельствуют, что некротическая гибель лимфоцитов даже в отдалённые сроки после хронического облучения отражает долговременное нарушение клеточного гомеостаза, тогда как апоптотический ответ в большей степени связан с эпигенетической регуляцией генов редокс-системы.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Киселев О.С. – разработка дизайна исследования. Сбор, анализ и интерпретация полученных результатов, написание текста статьи.

Блинова Е.А. – разработка дизайна исследования; интерпретация полученных результатов; редактирование текста статьи.

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

Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. Ilnytsky Y., Kovalchuk O. Non-targeted radiation effects — an epigenetic connection // *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2011. Vol. 714, No 1–2. P. 113–125. DOI: 10.1016/j.mrfmmm.2011.06.014.
2. Antwi D.A., Gabbara K.M., Lancaster W.D. et al. Radiation-induced epigenetic DNA methylation modification of radiation-response pathways // *Epigenetics*. 2013. Vol. 8, No 8. P. 839–848. DOI: 10.4161/epi.25498.
3. Kovalchuk O. Epigenetic changes and nontargeted radiation effects // *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2008. Vol. 49, No 1. P. 16–25. DOI: 10.1002/em.20358.
4. Belli M., Tabocchini M.A. Ionizing radiation-induced epigenetic modifications and their relevance to radiation protection // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No 17. Article 5993. DOI: 10.3390/ijms21175993.
5. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи / под ред. А.В. Аклеева. Челябинск: Книга, 2016.
6. Аклеев А.В. Механизмы эффектов хронического радиационного воздействия. Патогенез хронического лучевого синдрома // *Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сёл реки Теча*. Челябинск: Книга, 2012. С. 79–163.
7. Akleyev A.V., Krestinina L.Y., Degteva M.O., Tolstykh E.I. Consequences of the radiation accident at the Mayak Production Association in 1949–1956 // *Journal of*

- Radiological Protection*. 2017. Vol. 37, No 3. P. R19–R42.
8. Verheij M., Bartelink H. Radiation-induced apoptosis // *Cell and Tissue Research*. 2000. Vol. 301. P. 133–142. DOI: 10.1007/s004410000188.
9. Harms-Ringdahl M., Nicotera P., Radford I.R. Radiation induced apoptosis // *Mutation Research*. 1996. Vol. 366, No 2. P. 171–179. DOI: 10.1016/S0165-1110(96)90038-X.
10. Блинова Е.А., Аклеев А.А. Анализ показателей апоптотической гибели лимфоцитов у хронически облучённых лиц // *Российский иммунологический журнал*. 2017. Т. 11 (20), № 2. С. 107–109.
11. Аклеев А.А., Блинова Е.А., Долгушин И.И. Влияет ли апоптоз лимфоцитов в отдалённые сроки после хронического радиационного воздействия на иммунный статус человека? // *Российский иммунологический журнал*. 2018. Т. 12 (21), № 3. С. 205–210. DOI: 10.31857/S102872210002382-5.
12. Блинова Е.А., Котикова А.И., Янишевская М.А., Аклеев А.В. Апоптоз лимфоцитов и полиморфизм генов регуляции апоптоза у лиц, подвергшихся хроническому радиационному воздействию // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2020. Т. 65, № 4. С. 36–42. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-36-42.
13. Никифоров В.С., Блинова Е.А., Котикова А.И., Аклеев А.В. Транскрипционная активность генов репарации, апоптоза и клеточного цикла (TP53, MDM2, ATM, BAX, BCL-2, CDKN1A, OGG1, XPC, PADI4, MAPK8, NF-KB1, STAT3, GATA3) у хронически облучённых людей с различной интенсивностью апоптоза лимфоцитов периферической крови // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022. Т. 26, № 1. С. 50–58. DOI: 10.18699/VJGB-22-08.
14. Блинова Е.А., Никифоров В.С., Котикова А.И. и др. Статус метилирования генов апоптоза и интенсивность апоптотической гибели лимфоцитов периферической крови у лиц, подвергавшихся хроническому радиационному облучению // *Молекулярная биология*. 2022. Т. 56, № 6. С. 1072–1082. DOI: 10.31857/S0026898422050032.
15. Greenberg M.V.C., Bourc'his D. The diverse roles of DNA methylation in mammalian development and disease // *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2019. Vol. 20, No 10. P. 590–607. DOI: 10.1038/s41580-019-0159-6.
16. Edwards J.R., Yarychivska O., Boulard M., Bestor T.H. DNA methylation and DNA methyltransferases // *Epigenetics & Chromatin*. 2017. Vol. 10. Article 23. DOI: 10.1186/s13072-017-0130-8.
17. Блинова Е.А., Котикова А.И., Аклеев А.В. Влияние метилирования промоторов генов регуляции апоптоза на интенсивность клеточной гибели лимфоцитов у облучённых людей // *Вестник Московского университета. Серия 16. Биология*. 2024. Т. 79, № 4. С. 346–352. DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-79-4-12.
18. Spitz D.R., Azzam E.I., Li J.J., Gius D. Metabolic oxidation/reduction reactions and cellular responses to ionizing radiation: a unifying concept in stress response biology // *Cancer and Metastasis Reviews*. 2004. Vol. 23, No 3–4. P. 311–322.
19. Azzam E.I., Jay-Gerin J.P., Pain D. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury // *Cancer Letters*. 2012. Vol. 327, No 1–2. P. 48–60.
20. Cyr A.R., Hitchler M.J., Domann F.E. Regulation of SOD2 in cancer by histone modifications and CpG methylation: closing the loop between redox biology and epigenetics // *Antioxidants & Redox Signaling*. 2013. Vol. 18, № 15. P. 1946–1955. DOI: 10.1089/ars.2012.4850.
21. Киселев О.С., Кореченкова А.В., Блинова Е.А., Аклеев А.В. Уровень метилирования промоторов генов антиоксидантной и прооксидантной систем у хронически облучённых лиц // *Радиационная биология. Радиозекология*. 2026. Т. 66, № 1. С. 18–28. DOI: 10.7868/S3034590126010022.
22. Дегтева М.О., Напье Б.А., Толстых Е.И. и др. Распределение индивидуальных доз в когорте людей, облучённых в результате радиоактивного загрязнения реки Течи // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2019. Т. 64, № 3. С. 46–53. DOI: 10.12737/article_5cf2364cb49523.98590475.
23. Cosic-Mujkanovic N., Valadez-Cosmes P., Maitz K. et al. Myeloperoxidase alters lung cancer cell function to benefit

their survival // Antioxidants. 2023. Vol. 12, No 8. Article 1587. DOI: 10.3390/antiox12081587..

Immunology. 2016. Vol. 301. P. 35-42. DOI: 10.1016/j.cellimm.2015.12.003.

24. Okada S.S., Oliveira E.M., Araújo T.H. et al. Myeloperoxidase in human peripheral blood lymphocytes // Cellular

Поступила: 14.05.2026

Киселев Олег Сергеевич – младший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория молекулярной генетики и геномной инженерии, Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: kiselevoleg230@gmail.com; ORCID: 0009-0003-2826-1392, РИНЦ Author ID: 1319282

Блинова Евгения Андреевна – кандидат биологических наук, директор-главный научный сотрудник научно-исследовательского института радиационной биологии и радиационной медицины Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия; ORCID: 0000-0002-2567-7945, РИНЦ Author ID: 635868

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, исполняющий обязанности генерального директора Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия; ORCID: 0000-0003-2583-5808, РИНЦ Author ID: 119281

Для цитирования: Киселев О.С., Блинова Е.А., Аклеев А.В. Влияние метилирования и транскрипционной активности генов редокс-системы на клеточную гибель лимфоцитов крови у хронически облучённых лиц // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 27–33. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-27-33

Association of methylation and transcriptional activity of redox system genes with apoptosis and necrosis of lymphocytes in chronically irradiated individuals

Oleg S. Kiselev^{1,2}, Evgenia A. Blinova^{1,2}, Alexander V. Akleyev^{1,2}

¹ Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Chronic radiation exposure can induce persistent epigenetic changes that affect the mechanisms of cell death and the development of long-term biological effects. The role of methylation of redox system genes in the regulation of apoptosis and necrosis of lymphocytes in chronically exposed individuals remains insufficiently studied. The aim of the study is to assess the association of promoter region methylation and transcriptional activity of redox system genes with the intensity of apoptosis and necrosis of peripheral blood lymphocytes in chronically exposed individuals. Materials and Methods: The study included 171 individuals: 99 persons exposed to chronic low-intensity radiation and 72 individuals from the comparison group who lived under similar social and living conditions. Apoptosis and necrosis of peripheral blood lymphocytes were assessed by flow cytometry. Molecular analysis included assessment of CpG dinucleotide methylation in the promoter regions of redox system genes and determination of their transcriptional activity. Results and Discussion: The level of lymphocyte necrosis was statistically significantly higher in the group of chronically exposed individuals compared with the comparison group ($p=0.033$). Necrosis positively correlated with radiation doses to red bone marrow ($p=0.24$; $p=0.001$), thymus and peripheral lymphoid organs ($p=0.19$; $p=0.013$). Analysis of apoptosis revealed statistically significant positive correlations with methylation levels of SOD2 ($p=0.18$; $p=0.017$), GPX1 ($p=0.26$; $p=0.001$), GSTP1 ($p=0.22$; $p=0.004$), MPO ($p=0.41$; $p<0.0001$), and CAT ($p=0.21$; $p=0.006$). According to multiple regression analysis, apoptosis was associated with GSTP1 and MPO methylation. Conclusion: Thus, in chronically exposed individuals in the long-term period after exposure, necrotic lymphocyte death is predominantly associated with radiation dose, whereas apoptosis is associated with hypermethylation of promoter regions of redox system genes.

Key words: chronic radiation exposure, peripheral blood lymphocytes, apoptosis; necrosis, redox system, DNA methylation, transcriptional activity, antioxidant system genes.

Authors' personal contribution

Kiselev O.S. – study design development, data collection, analysis and interpretation of the results, writing the original draft of the manuscript.

Blinova E.A. – study design development, interpretation of the results, review and editing of the manuscript.

Akleyev A.V. – scientific supervision, review and editing of the manuscript, interpretation of the data, final approval of the manuscript for publication.

Acknowledgements

The authors are grateful to reviewers for their work.

Oleg S. Kiselev

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

Address for correspondence: 19, Ozerskoye Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail:

kiselevoleg230@gmail.com

Conflict of interests

The authors state that there is no potential conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out with the financial support of the Federal Medical and Biological Agency, within the framework of the Federal target program "Ensuring nuclear and radiation safety for 2016-2020 and for the period up to 2030".

References

1. Ilnytskyi Y, Kovalchuk O. Non-targeted radiation effects — an epigenetic connection. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2011;714(1–2): 113–125. DOI: 10.1016/j.mrfmmm.2011.06.014.
2. Antwi DA, Gabbara KM, Lancaster WD, Ruden DM, Zielske SP. Radiation-induced epigenetic DNA methylation modification of radiation-response pathways. *Epigenetics*. 2013;8(8): 839–848. DOI: 10.4161/epi.25498.
3. Kovalchuk O. Epigenetic changes and nontargeted radiation effects. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2008;49(1): 16–25. DOI: 10.1002/em.20358.
4. Belli M, Tabocchini MA. Ionizing radiation-induced epigenetic modifications and their relevance to radiation protection. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(17): 5993. DOI: 10.3390/ijms21175993.
5. Consequences of radioactive contamination of the Techa River / ed. Akleyev AV. Chelyabinsk: Kniga; 2016. (In Russian).
6. Akleyev AV. Mechanisms of the effects of chronic radiation exposure. Pathogenesis of chronic radiation syndrome. In: Chronic radiation syndrome in residents of the Techa riverside villages. Chelyabinsk: Kniga; 2012. P. 79–163. (In Russian).
7. Akleyev AV, Krestinina LY, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak Production Association in 1949–1956. *Journal of Radiological Protection*. 2017;37(3): R19–R42.
8. Verheij M, Bartelink H. Radiation-induced apoptosis. *Cell and Tissue Research*. 2000;301: 133–142. DOI: 10.1007/s004410000188.
9. Harms-Ringdahl M, Nicotera P, Radford IR. Radiation induced apoptosis. *Mutation Research*. 1996;366(2): 171–179. DOI: 10.1016/S0165-1110(96)90038-X.
10. Blinova EA, Akleyev AA. Analysis of apoptotic death indicators in lymphocytes of chronically exposed individuals. *Rossiyskiy immunologicheskii zhurnal=Russian Journal of Immunology*. 2017;11(20)(2): 107–109. (In Russian).
11. Akleyev AA, Blinova EA, Dolgushin II. Does lymphocyte apoptosis in the long-term period after chronic radiation exposure affect human immune status? *Rossiyskiy immunologicheskii zhurnal=Russian Journal of Immunology*. 2018;12(21)(3): 205–210. (In Russian). DOI: 10.31857/S102872210002382-5.
12. Blinova EA, Kotikova AI, Yanishevskaya MA, Akleyev AV. Lymphocyte apoptosis and polymorphisms of apoptosis regulation genes in individuals exposed to chronic radiation. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost=Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020;65(4): 36–42. (In Russian). DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-36-42.
13. Nikiforov VS, Blinova EA, Kotikova AI, Akleyev AV. Transcriptional activity of repair, apoptosis and cell cycle genes (TP53, MDM2, ATM, BAX, BCL-2, CDKN1A, OGG1, XPC, PADI4, MAPK8, NF-KB1, STAT3, GATA3) in chronically exposed persons with different intensity of peripheral blood lymphocyte apoptosis. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii=Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(1): 50–58. (In Russian). DOI: 10.18699/VJGB-22-08.
14. Blinova EA, Nikiforov VS, Kotikova AI, Yanishevskaya MA, Akleyev AV. Methylation status of apoptosis genes and intensity of apoptotic death of peripheral blood lymphocytes in individuals exposed to chronic radiation. *Molekulyarnaya biologiya=Molecular Biology*. 2022;56(6): 1072–1082. (In Russian). DOI: 10.31857/S0026898422050032.
15. Greenberg MVC, Bourc'his D. The diverse roles of DNA methylation in mammalian development and disease. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2019;20(10): 590–607. DOI: 10.1038/s41580-019-0159-6.
16. Edwards JR, Yarychkivska O, Boulard M, Bestor TH. DNA methylation and DNA methyltransferases. *Epigenetics & Chromatin*. 2017;10: 23. DOI: 10.1186/s13072-017-0130-8.
17. Blinova EA, Kotikova AI, Akleyev AV. Influence of methylation of apoptosis regulation gene promoters on the intensity of lymphocyte cell death in exposed individuals. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16. Biologiya=Lomonosov Biology Journal*. 2024;79(4): 346–352. (In Russian). DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-79-4-12.
18. Spitz DR, Azzam EI, Li JJ, Gius D. Metabolic oxidation/reduction reactions and cellular responses to ionizing radiation: a unifying concept in stress response biology. *Cancer and Metastasis Reviews*. 2004;23(3–4): 311–322.
19. Azzam EI, Jay-Gerin JP, Pain D. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer Letters*. 2012;327(1–2): 48–60.
20. Cyr AR, Hitchler MJ, Domann FE. Regulation of SOD2 in cancer by histone modifications and CpG methylation: closing the loop between redox biology and epigenetics. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2013;18(15): 1946–1955. DOI: 10.1089/ars.2012.4850.
21. Kiselev OS, Korechenkova AV, Blinova EA, Akleyev AV. Methylation level of promoter regions of antioxidant and prooxidant system genes in chronically exposed individuals. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya=Radiation Biology. Radioecology*. 2026;66(1): 18–28. (In Russian). DOI: 10.7868/S3034590126010022.
22. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina E, Bougrov N, Krestinina L, et al. Distribution of individual doses in the cohort exposed due to radioactive contamination of the Techa River. *Medical Radiology and radiation safety*. 2019;64(3): 46–53. DOI: 10.12737/article_5cf2364cb49523.98590475.
23. Cosic-Mujanovic N, Valadez-Cosmes P, Maitz K, Lueger A, Mihalic ZN, Runtsch MC, et al. Myeloperoxidase alters lung cancer cell function to benefit their survival. *Antioxidants*. 2023;12(8): 1587. DOI: 10.3390/antiox12081587.
24. Okada SS, Oliveira EM, Araújo TH, Rodrigues MR, Albuquerque RCh, Mortara RA, et al. Myeloperoxidase in human peripheral blood lymphocytes. *Cellular Immunology*. 2016;301: 35–42. DOI: 10.1016/j.cellimm.2015.12.003.

Received: May 14, 2026

For correspondence: Oleg S. Kiselev – Junior Researcher, Laboratory of Molecular Genetics and Genetic Engineering, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency (19, Ozerskoye Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: kiselevoleg230@gmail.com); ORCID: 0009-0003-2826-1392, RSCI Author ID: 1319282

Evgenia A. Blinova – Candidate of Biological Sciences, Director – Chief Researcher, Research Institute of Radiation Biology and Radiation Medicine, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia; ORCID: 0000-0002-2567-7945, RSCI Author ID: 635868

Alexander V. Akleyev – Doctor of Medical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Acting Director General, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia; ORCID: 0000-0003-2583-5808, RSCI Author ID: 119281

For citation: Kiselev O.S., Blinova E.A., Akleyev A.V. Association of methylation and transcriptional activity of redox system genes with apoptosis and necrosis of lymphocytes in chronically irradiated individuals. *Radiatsionnaya Gygiena=Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 27–33. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-27-33

Дозы облучения пациентов при проведении цифровой маммографии в Санкт-Петербурге и Ленинградской области

Водоватов А.В.^{1,2}, Косарлукова Е.А.¹, Костина К.Е.¹, Репин Л.В.¹, Горский Г.А.^{1,3}, Лихун Д.А.⁴

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

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

³ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу и Ленинградской области, Санкт-Петербург, Россия

Золотым стандартом ранней диагностики злокачественных новообразований молочной железы является маммография (рентгеновское исследование молочной железы), выполняемая на цифровых и аналоговых рентгеновских аппаратах. Данная процедура выполняется всем женщинам в возрасте от 40 до 75 лет на регулярной основе (1 раз в год или два года); при этом выполняют маммографию обеих молочных желез в двух проекциях (4 рентгеновских снимка). Дозы от маммографии в соответствии с Нормами радиационной безопасности НРБ 99/2009 не должны превышать 1 мЗв в год. Таким образом, достоверная оценка уровней облучения пациентов для данной процедуры является особо актуальной. Целью исследования являлась оценка уровней облучения при проведении маммографических процедур в медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Материалы и методы: Сбор данных был выполнен в 99 медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области в период 2023–2025 гг. для 141 цифрового маммографа. Для каждого маммографа выполнили оценки поглощенных доз в молочной железе и эффективных доз пациентов для различных толщин молочной железы в состоянии компрессии (2, 4, 6, 8 и 10 см) и проекций облучения (прямой и косой) в соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.2944–11. Результаты исследования и обсуждение: Средние эффективные дозы за 1 маммографию в прямой или косой проекциях находились в диапазоне 0,05–0,07 мЗв; эффективные дозы за маммографическое исследование (2 снимка в прямой и 2 снимка в косой проекциях) – 0,2–0,3 мЗв. При этом наблюдались существенные различия в диапазонах доз облучения пациентов: отношение минимальной и максимальной поглощенной дозы в молочной железе и эффективной дозы составляли до 60 раз соответственно. Основными факторами, определяющими дозы облучения пациентов, являются экспозиция и радиационный выход рентгеновского аппарата. Достоверной корреляции между дозами облучения пациентов и анодным напряжением, расстоянием источник-приемник и комбинацией анода и дополнительной фильтрации не установлено. Толщина молочной железы в состоянии компрессии также достоверно не влияла на эффективную дозу. Заключение: Несмотря на то, что средние уровни облучения пациентов при проведении цифровой маммографии являются приемлемыми и сопоставимы с международной практикой, для ряда аппаратов уровни облучения являются аномально высокими. Для таких аппаратов проведение мероприятий по оптимизации радиационной защиты пациентов является приоритетным.

Ключевые слова: цифровая маммография, эффективная доза, поглощенная доза в молочной железе, оптимизация, профилактические исследования.

Введение

Рак молочной железы (РМЖ) является самым распространенным онкологическим заболеванием среди женщин. По данным агентства GLOBOCAN в 2020 году в мире зарегистрировано 2 261 419 случаев РМЖ, что составляет 11,7 % от всех злокачественных новообразований (ЗНО) [1, 2]. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) примерно в половине случаев РМЖ встречается у женщин, не имеющих каких-либо специфических факторов риска,

за исключением пола и возраста. Смертность при РМЖ в 2020 году составила 684 996 (6,9 % всей смертности от ЗНО) [2, 3]. РМЖ остается основной причиной смерти от ЗНО у женщин [1, 2]. В Российской Федерации РМЖ прочно удерживает первое место в структуре женской онкологической заболеваемости, составляя в 2023 год около 23 % всех случаев [4]. Наибольший удельный вес заболеваемости РМЖ приходится на возрастную группу 30–59 лет (17,6 %). Золотым стандартом ранней диагностики злокачественных новообразований молочной железы является

Водоватов Александр Валерьевич

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

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E mail: vodovatoff@gmail.com

маммография (рентгеновское исследование молочной железы), выполняемая на цифровых и аналоговых рентгеновских аппаратах. В 2024 году в Российской Федерации было выполнено 2,7 миллиона маммографических процедур (0,3 миллиона на аналоговых и 2,4 миллиона на цифровых аппаратах соответственно), что соответствует коллективной дозе в 2800 чел.-Зв. Маммографии вносят 12 % вклада в коллективную дозу от рентгенографических процедур.

Маммографические процедуры выполняются как в целях диагностики патологических состояний молочной железы (карцином, фиброаденом, цист, гинекомастий, и пр.) [5], так и в рамках скрининговых программ. В соответствии с действующими клиническими рекомендациями [2], массовые маммографические обследования проводятся женщинам в возрасте от 40 до 75 лет включительно в рамках первого этапа диспансеризации 1 раз в два года. Также маммографии выполняют в рамках первичных (однократно) и периодических (1 раз в год) медицинских осмотров для отдельных категорий работников¹. При этом выполняют маммографию обеих молочных желез в двух проекциях (4 рентгеновских снимка).

В действующих Нормах радиационной безопасности НРБ 99/2009² годовая эффективная доза практически здоровых лиц, проходящих обоснованные профилактические рентгенорадиологические обследования, или обследования в связи с профессиональной деятельностью, не должна превышать 1 мЗв. Данное ограничение в соответствии с Комментариями к Нормам радиационной безопасности [6] интерпретируется как гигиенический норматив. В связи с тем, что эффективные дозы при маммографии будут определяться антропометрическими характеристиками пациентов (главным образом толщиной молочной железы в состоянии компрессии), возможно превышение суммарной годовой эффективной дозы за флюорографию и маммографию 1 мЗв для отдельных пациентов [7]. Вышеуказанные факторы обуславливают особый интерес к оценке доз облучения и радиационных рисков пациентов, проходящих маммографические процедуры.

В зарубежной литературе представлены детальные оценки уровней облучения пациентов, проходящих маммографические процедуры на различных рентгеновских аппаратах [8–17]. В отечественных источниках актуальные данные о дозах облучения пациентов отсутствуют,

что затрудняет достоверную оценку выполнимости и применимости требований НРБ 99/2009.

Цель исследования – выполнить оценку уровней облучения пациентов при проведении маммографических процедур в медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Материалы и методы

Дизайн исследования: ретроспективное поперечное исследование. Сбор данных был выполнен в 99 медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области в период 2023–2025 гг. для 141 цифрового маммографа. Для каждого маммографа выполнили оценки поглощённых доз в молочной железе (ПДМ) и эффективных доз (ЭД) пациентов для различных толщин молочной железы в состоянии компрессии (2, 4, 6, 8 и 10 см) и проекций облучения (прямой и косой).

В соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.2944-11³ для оценки доз облучения пациентов для каждого протокола маммографии собирали следующие параметры: расстояние источник-приемник (РИП, см); анодное напряжение (кВ); экспозиция (мАс); и радиационный выход маммографа для соответствующего напряжения (мГр×м²/мАс). Для каждого маммографа также фиксировали комбинацию анода мишени и дополнительного фильтра рентгеновского излучения. После верификации полученных данных в выборку протоколов проведения цифровых маммографических процедур для дальнейшего статистического анализа было включено 859 протоколов. Верификация включала в себя исключение протоколов с эффективными дозами ниже 0,005 мЗв как заведомо недостоверных.

Статистическая обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 12 и Microsoft Excel 2016.

Результаты и обсуждение

Сводная информация о параметрах проведения маммографических процедур в выбранных медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области представлена в таблице 1.

Сведения о рассчитанных ПДМ и ЭД представлены в таблице 2.

¹ Приказ Министерства здравоохранения РФ от 28 января 2021 г. N 29н "Об утверждении Порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров работников, предусмотренных частью четвертой статьи 213 Трудового кодекса Российской Федерации, перечня медицинских противопоказаний к осуществлению работ с вредными и (или) опасными производственными факторами, а также работам, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры" (с изменениями и дополнениями) [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated January 28, 2021 No. 29n "On approval of the Procedure for conducting mandatory preliminary and periodic medical examinations of employees, provided for in Part Four of Article 213 of the Labor Code of the Russian Federation, a list of medical contraindications to work with harmful and (or) hazardous production factors, as well as work during the performance of which mandatory preliminary and periodic medical examinations are carried out" (with amendments and additions) (In Russ.)]

² Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. No 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный No 14534. [Sanitary Rules and Regulations SanPiN 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standards (RSS-99/2009)". Approved by Decree No. 47 of the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation on July 7, 2009. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on August 14, 2009, Registration No. 14534 (In Russ.)]

³ МУ 2.6.1.2944-11. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. Методические указания" (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19.07.2011) (ред. от 30.10.2019) ["МУ 2.6.1.2944-11. 2.6.1. Ionizing Radiation, Radiation Safety. Control of Effective Radiation Doses to Patients During Medical X-Ray Examinations. Methodical Guidelines" (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on July 19, 2011) (as amended on October 30, 2019) (In Russ.)]

Таблица 1. Параметры проведения маммографических процедур в медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Данные представлены в формате: среднее $\pm$ СКО (минимум – максимум)

[Table 1. Basic protocol parameters for digital mammography procedures performed in medical facilities in St. Petersburg and Leningrad Region. Data presented as: mean $\pm$ SD (min – max)]

Толщина железы при компрессии, см [Compressed breast thickness, cm]	Проекция [Projection]	Число протоколов, шт [Number of protocol, pcs]	РИП, см [FID, cm]	Анодное напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Экспозиция, мАс [Tube current time product, mAs]	Радиационный выход, мГр $\times$ м ² /мАс [Radiation output, mGy $\times$ m ² /(mAs)]
2	Прямая [Craniocaudal]	118	63 $\pm$ 6 (18 – 66)	26 $\pm$ 2,4 (22 – 34)	32,2 $\pm$ 17,9 (2,3 – 110)	0,017 $\pm$ 0,015 (0,003 – 0,1)
	Косая [Oblique]	63	60 $\pm$ 6,38 (18 – 65)	26 $\pm$ 2,4 (22 – 34)	39 $\pm$ 23,4 (8,4 – 127)	0,017 $\pm$ 0,015 (0,003 – 0,074)
4	Прямая [Craniocaudal]	131	63 $\pm$ 5,67 (20 – 68)	27 $\pm$ 2,4 (23 – 34)	50 $\pm$ 25,8 (4,5 – 176)	0,02 $\pm$ 0,022 (0,002 – 0,22)
	Косая [Oblique]	76	60 $\pm$ 5,76 (20 – 68)	28 $\pm$ 2,2 (24 – 32)	57,5 $\pm$ 32,5 (10,9 – 178)	0,02 $\pm$ 0,015 (0,002 – 0,074)
6	Прямая [Craniocaudal]	130	63 $\pm$ 5,58 (22 – 68)	28 $\pm$ 2,5 (24 – 35)	63,4 $\pm$ 35,4 (4,4 – 202,3)	0,024 $\pm$ 0,023 (0,004 – 0,22)
	Косая [Oblique]	75	60 $\pm$ 5,6 (22 – 68)	30 $\pm$ 2,3 (25 – 34)	74 $\pm$ 32,7 (15 – 162)	0,025 $\pm$ 0,015 (0,004 – 0,07)
8	Прямая [Craniocaudal]	125	63 $\pm$ 5,52 (24 – 68)	30 $\pm$ 2,7 (25 – 35)	80 $\pm$ 56,1 (4,4 – 319,4)	0,029 $\pm$ 0,024 (0,005 – 0,22)
	Косая [Oblique]	66	60 $\pm$ 5,68 (24 – 68)	30,5 $\pm$ 2,4 (25 – 35)	92,7 $\pm$ 51,2 (14,8 – 257)	0,032 $\pm$ 0,016 (0,008 – 0,066)
10	Прямая [Craniocaudal]	50	63 $\pm$ 4,72 (30 – 63)	30,5 $\pm$ 2,3 (27 – 35)	85 $\pm$ 28,7 (4,4 – 149,8)	0,029 $\pm$ 0,02 (0,014 – 0,116)
	Косая [Oblique]	5	60 $\pm$ 1,64 (60 – 63)	35 $\pm$ 0,9 (33 – 35)	100 $\pm$ 29,9 (32 – 100)	0,036 $\pm$ 0,019 (0,028 – 0,074)

Таблица 2. Поглощенные дозы в молочной железе (ПДМ) и эффективные дозы (ЭД) при проведении цифровой маммографии в медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Данные представлены в формате: среднее $\pm$ СКО (минимум – максимум)

[Table 2. Absorbed glandular doses (AGD) and effective doses (ED) for digital mammography procedures performed in medical facilities in St. Petersburg and Leningrad Region. Data presented as: mean $\pm$ SD (min – max)]

Толщина молочной железы в состоянии компрессии, см [Compressed breast thickness, cm]	Проекция [Projection]	ПДМ, мГр [AGD, mGy]		ЭД, мЗв [ED, mSv]			
		За 1 снимок [Per one image]	ОММ* [MMR]	Сумма за исследование** [Sum per examination]	За 1 снимок [Per one image]	ОММ* [MMR]	Сумма за исследование** [Sum per examination]
2	Прямая [Craniocaudal]	1,05 $\pm$ 0,9 (0,14 – 6,07)	44	5,0 / 27,5	0,05 $\pm$ 0,05 (0,007 – 0,3)	44	0,24 / 1,37
	Косая [Oblique]	1,44 $\pm$ 1,4 (0,17 – 7,67)	46		0,07 $\pm$ 0,07 (0,008 – 0,38)	46	
4	Прямая [Craniocaudal]	1,07 $\pm$ 0,83 (0,11 – 5,35)	50	4,6 / 24,7	0,05 $\pm$ 0,04 (0,005 – 0,27)	50	0,22 / 1,24
	Косая [Oblique]	1,2 $\pm$ 0,94 (0,14 – 7,01)	50		0,06 $\pm$ 0,05 (0,006 – 0,35)	50	
6	Прямая [Craniocaudal]	1,18 $\pm$ 0,95 (0,12 – 7,07)	57	4,9 / 24,9	0,06 $\pm$ 0,05 (0,006 – 0,38)	60	0,24 / 1,30
	Косая [Oblique]	1,28 $\pm$ 0,84 (0,16 – 5,29)	33		0,06 $\pm$ 0,04 (0,008 – 0,27)	33	
8	Прямая [Craniocaudal]	1,47 $\pm$ 1,55 (0,27 – 12,4)	46	6,2 / 32,4	0,08 $\pm$ 0,08 (0,01 – 0,66)	46	0,31 / 1,70
	Косая [Oblique]	1,61 $\pm$ 1,00 (0,27 – 3,82)	14		0,08 $\pm$ 0,05 (0,01 – 0,19)	14	
10	Прямая [Craniocaudal]	1,00 $\pm$ 0,36 (0,34 – 1,72)	5	4,6 / 7,3	0,05 $\pm$ 0,02 (0,02 – 0,09)	5	0,23 / 0,36
	Косая [Oblique]	1,31 $\pm$ 0,44 (0,68 – 1,86)	3		0,07 $\pm$ 0,02 (0,04 – 0,09)	2	

* Отношение максимального к минимальному значения [Maximum to minimum ratio].

** Исследование, включающее в себя 2 снимка в прямой и 2 снимка в боковых проекциях. Данные представлены в формате: средняя доза за исследование / максимальная доза за исследование [Examination includes 2 images in craniocaudal projection and 2 images in oblique projection. Data presented as: mean dose per examination / maximum dose per examination].

Анализ данных, представленных в таблице 1, демонстрирует прямую положительную связь экспозиции и анодного напряжения с увеличением толщины молочной железы в состоянии компрессии. Для получения качественного изображения с увеличением толщины и плотности молочной железы необходимо увеличивать интенсивность потока рентгеновского излучения (увеличивать силу тока и время экспозиции), увеличивать энергию рентгеновского излучения, или использовать комбинацию этих параметров. Следует отметить, что рост анодного напряжения ассоциирован со снижением контраста, т.е. со снижением диагностического качества изображения.

Результаты, представленные в таблице 2, свидетельствуют о существенных различиях в дозах облучения пациентов при проведении цифровой маммографии: отношение минимальной и максимальной ПДМ и ЭД составляют до 60 раз соответственно. Основными факторами, определяющими дозы облучения пациентов, являются экспозиция и радиационный выход рентгеновского аппарата. Эти показатели находятся в средней положительной корреляции с ПДМ и ЭД (коэффициенты корреляции Спирмена – в диапазоне от 0,4 до 0,6; $p < 0,005$). Достоверной корреляции

между дозами облучения пациентов и анодным напряжением, РИП и комбинацией анода и дополнительной фильтрации не установлено.

Для определения степени влияния проекции облучения и толщины молочной железы в состоянии компрессии на эффективную дозу был использован непараметрический дисперсионный анализ Краскела-Уоллиса с дальнейшим попарным сравнением всех комбинаций выборок с использованием критерия Манна-Уитни. Результаты сравнения показали отсутствие достоверных различий между дозами в прямой и косой проекциях для всех толщин молочной железы. Для маммографий, выполненных в прямой проекции, достоверные различия ($p < 0,05$) наблюдались только для выборок эффективных доз для толщин молочной железы 2 и 8 см; для маммографий, выполненных в косой проекции, достоверные различия отсутствовали для всех толщин молочной железы. Распределения эффективных доз за 1 снимок для различных толщин молочной железы в состоянии компрессии представлены на рисунках 1 и 2 для прямой и косой проекций соответственно.

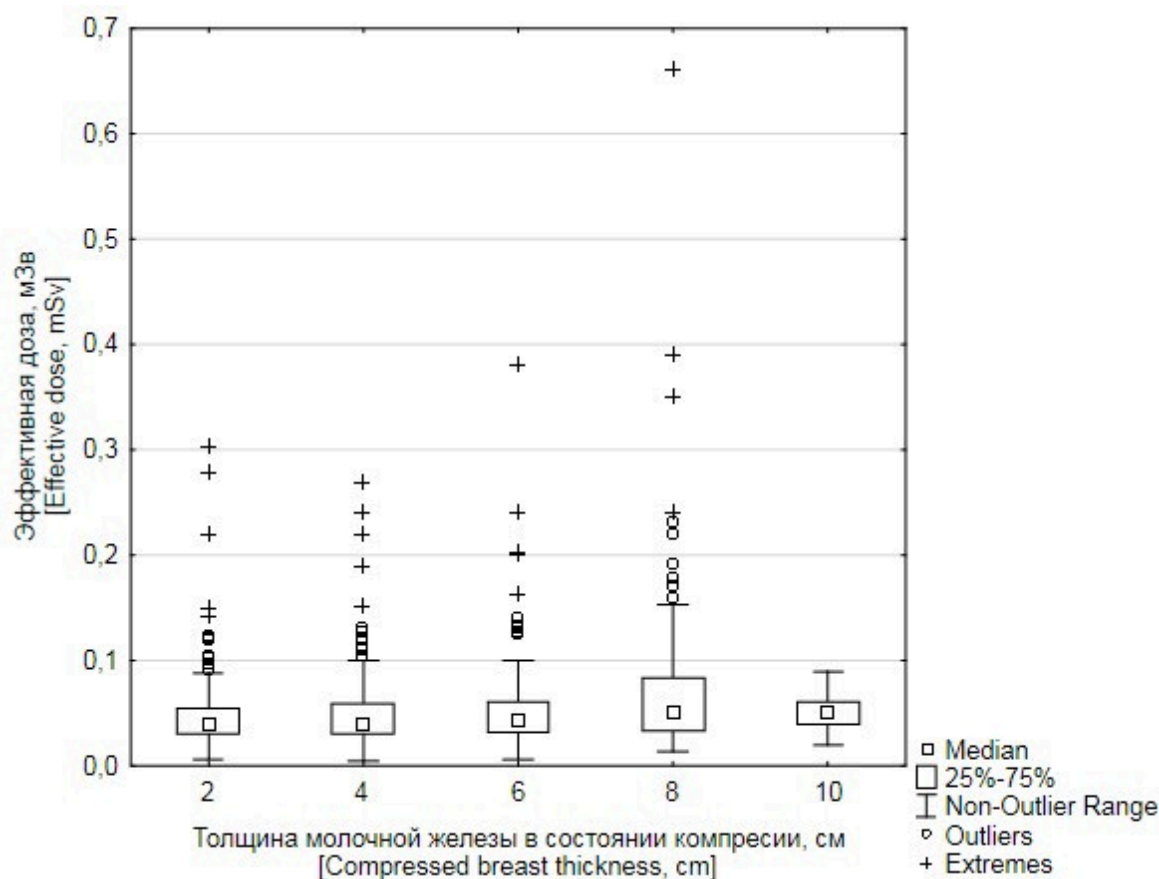


Рис. 1. Распределения эффективных доз для различных толщин молочной железы в состоянии компрессии для процедур цифровой маммографии, выполненных в прямой проекции. «○» – значения, превышающие 95-й перцентиль распределения эффективных доз; «+» – значения, превышающие 99-й перцентиль распределения эффективных доз

[Fig. 1. Distribution of effective doses for various compressed breast thicknesses in craniocaudal projections from digital mammography procedures. "○" – values exceeding the 95th percentile of the effective dose distribution; "+" – values exceeding the 99th percentile of the effective dose distribution]

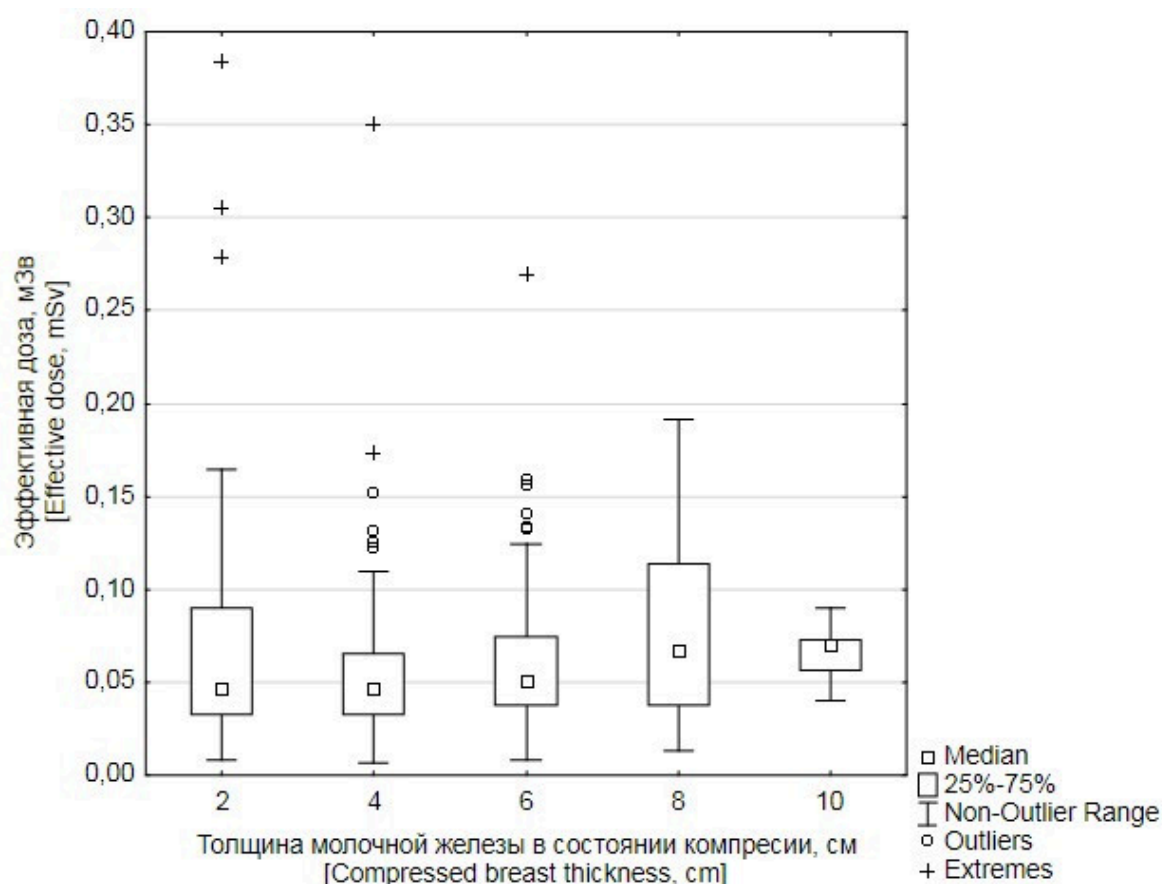


Рис. 2. Распределения эффективных доз для различных толщин молочной железы в состоянии компрессии для процедур цифровой маммографии, выполненных в косой проекции. «○» – значения, превышающие 95-й перцентиль распределения эффективных доз; «+» – значения, превышающие 99-й перцентиль распределения эффективных доз

[Fig. 2. Distribution of effective doses for various compressed breast thicknesses in mediolateral oblique projections during digital mammography procedures. “○” – values exceeding the 95th percentile of the effective dose distribution; “+” – values exceeding the 99th percentile of the effective dose distribution]

Результаты оценки эффективных доз пациентов за маммографическое исследование (4 снимка) показывают, что они в среднем находятся в диапазоне 0,2–0,3 мЗв. В то же время, для ряда аппаратов суммарная эффективная доза за исследование может превышать 1 мЗв, что противоречит требованиям НРБ 99/2009. Следует еще раз отметить отсутствие различий в суммарных эффективных дозах для пациен-

тов с различной толщиной молочной железы. Данная особенность отмечается также и в зарубежных публикациях с анализом уровней облучения при цифровой маммографии [15].

ПДМ, определенные в настоящем исследовании, были сравнены с данными из зарубежных публикаций. Результаты сравнения представлены в таблице 3. Следует отметить, что в зарубежных источниках представлены ПДМ, усредненные по проекциям.

Таблица 3. Сравнение ПДМ с опубликованными данными. Данные представлены в формате: среднее (минимум-максимум).

[Table 3. Comparison of AGD from the current study with published data. Data presented as: mean (minimum-maximum)]

Толщина железы при компрессии, см [Compressed breast thickness, cm]	ПДМ, мГр, собственные данные [AGD, mGy, current study]		ПДМ, мГр, литературные данные [AGD, mGy, published data]		
	Прямая [Craniocaudal]	Косая [Oblique]	Du X., Yu. N., Zhang Y., Wang J.T [15]	Laji U.C., Jeukens C.R., Houben I. et al. [17]	Hendrick R.E., Pisano E.D., Averbukh A. et al. [9]
< 2	1,05	1,44	1,02 (0,87 – 1,17)		1,14 (0,79 – 1,59)
2–3	(0,14 – 6,07)	(0,17 – 7,67)	1,60 (1,48 – 1,72)	1,15 (0,69 – 1,75)	1,40 (1,11 – 1,74)
3–4	1,07	1,2	1,72 (1,62 – 1,82)		1,70 (1,59 – 1,81)
4–5	(0,11 – 5,35)	(0,14 – 7,01)	1,75 (1,67 – 1,83)	1,30 (0,90 – 2,60)	1,86 (1,76 – 1,96)

Толщина железы при компрессии, см [Compressed breast thickness, cm]	ПДМ, мГр, собственные данные [AGD, mGy, current study]		ПДМ, мГр, литературные данные [AGD, mGy, published data]		
	Прямая [Craniocaudal]	Косая [Oblique]	Du X., Yu. N., Zhang Y., Wang J.T [15]	Lalji U.C., Jeukens C.R., Houben I. et al. [17]	Hendrick R.E., Pisano E.D., Averbukh A. et al. [9]
5–6	1,18	1,28	1,98 (1,88 – 2,08)	1,80 (1,10 – 2,80)	2,08 (1,98 – 2,22)
6–7	(0,12 – 7,07)	(0,16 – 5,29)			2,27 (2,17 – 2,40)
7–8	1,47 (0,27 – 12,4)	1,61 (0,27 – 3,82)	2,30 (2,12 – 2,48)	2,00 (1,40 – 2,70)	2,92 (1,88 – 3,96)
> 8	1,00 (0,34 – 1,72)	1,31 (0,68 – 1,86)		2,19 (1,90 – 2,71)	2,50 (2,12 – 3,01)

Результаты, представленные в таблице 3, свидетельствуют о хорошей сходимости отечественных и зарубежных данных: различия в средних значениях ПДМ не превышают полутора раз. В то же время наблюдаются значимые различия в минимальных (до 10 раз) и максимальных (до 5 раз) значениях ПДМ. Это еще раз подчеркивает значительный потенциал для оптимизации протоколов проведения цифровой маммографии в отечественной практике.

По результатам настоящего исследования были идентифицированы маммографы с аномально высокими дозами облучения пациентов, для которых проведение оптимизации радиационной защиты пациентов является приоритетным. К данной группе относятся аппараты, эффективные дозы для которых находятся за пределами 90-го перцентиля распределения эффективных доз. Аномально высокие дозы наблюдались для различных моделей маммографов; достоверная корреляция между сроком эксплуатации маммографа, типом приемника рентгеновского изображения и дозами облучения пациентов отсутствовала. Для данных маммографов необходимо провести повторный сбор данных; при подтверждении сохранения аномально высоких доз – проводить коррекцию параметров проведения процедур. Также целесообразно сосредоточиться на разработке единых типовых протоколов, обеспечивающих необходимое диагностическое качество изображения при поддержании доз облучения пациентов на приемлемом уровне.

Заключение

В данной работе был выполнен анализ уровней облучения пациентов при проведении цифровой маммографии в 99 медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области для 141 цифрового маммографа в период 2023–2025 гг. Средние эффективные дозы за 1 маммографию в прямой или косой проекциях находились в диапазоне 0,05–0,07 мЗв; эффективные дозы за маммографическое исследование (2 снимка в прямой и 2 снимка в косой проекциях) – 0,2–0,3 мЗв. При этом наблюдались существенные различия в диапазонах доз облучения пациентов: отношение минимальной и максимальной поглощенной дозы в молочной железе и эффективной дозы составляли до 60 раз соответственно. Основными факторами, определяющими дозы облучения пациентов, являются экспозиция и радиационный выход рентгеновского аппарата. Достоверной корреляции между дозами облучения пациентов и анодным

напряжением, РИП и комбинацией анода и дополнительной фильтрации не установлено. Толщина молочной железы в состоянии компрессии также достоверно не влияла на эффективную дозу. Различия в средних значениях поглощенной дозы в молочной железе между настоящим исследованием и актуальными литературными зарубежными данными не превышают полутора раз. В то же время наблюдаются значимые различия в минимальных (до 10 раз) и максимальных (до 5 раз) значениях поглощенной дозы в молочной железе. Это еще раз подчеркивает значительный потенциал для оптимизации протоколов проведения цифровой маммографии в отечественной практике.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Водоватов А.В. разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, подготовил окончательный вариант рукописи.

Косарлукова Е.А. провела анализ данных, редактировала промежуточный вариант рукописи.

Костина К.Е. провела анализ данных, редактировала промежуточный вариант рукописи.

Репин Л.В. провел анализ данных, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Горский Г.А. организовал проведение исследований в Санкт-Петербурге и Ленинградской области и отредактировал промежуточный вариант статьи.

Лихун Д.А. организовал проведение исследований в Санкт-Петербурге и Ленинградской области и отредактировал промежуточный вариант статьи.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Исследования выполнены в рамках выполнения НИР «Научное обоснование Концепции обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при проведении современных рентгенорадиологических процедур».

Литература

1. Cancer today. GLOBOCAN. URL: <https://gco.iarc.fr> (Дата обращения: 06.04.2026).

2. Драпкина О.М., Каприн А.Д., Алмазова И.И. и др. Скрининг злокачественных новообразований молочной железы в рамках диспансеризации определенных групп взрослого населения. Методические рекомендации // Первичная медико-санитарная помощь. 2024. Т. 1, № 1. С. 63-80. DOI: 10.15829/3034-4123-2024-5.
3. Рак молочной железы. Всемирная организация здравоохранения. URL: <https://www.who.int/ru> (Дата обращения: 06.04.2026).
4. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. 276 с.
5. Bontrager K.L., Lampignano J.P. Textbook of radiographic positioning and related anatomy. 8th ed. Mosby, 2014. 826 p.
6. Водоватов А.В. Совершенствование норм радиационной безопасности. Часть 1: целесообразность ограничения доз медицинского облучения практически здоровых лиц // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 3. С. 115-124. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-115-124.
7. Hendrick R.E. Radiation doses and cancer risks from breast imaging studies // Radiology. 2010. Vol. 257, No. 1. P. 246-253. DOI: 10.1148/radiol.10100570.
8. Hendrick R.E., Pisano E.D., Averbukh A. et al. Comparison of acquisition parameters and breast dose in digital mammography and screen-film mammography in the American College of Radiology Imaging Network digital mammographic imaging screening trial // AJR. American Journal of Roentgenology. 2010. Vol. 194 (2). P. 362-369. DOI: 10.2214/AJR.08.2114.
9. Sulieman A., Serhan O., Al-Mohammed H.I. et al. Estimation of cancer risks during mammography procedure in Saudi Arabia // Saudi Journal of Biological Sciences. 2019. Vol. 26 (6). P. 1107-1111. DOI: 10.1016/j.sjbs.2018.10.005.
10. Baek J.E., Kang B.J., Kim S.H., Lee H.S. Radiation dose affected by mammographic composition and breast size: first application of a radiation dose management system for full-field digital mammography in Korean women // World Journal of Surgical Oncology. 2017. Vol. 15. P. 38. DOI: 10.1186/s12957-017-1107-6.
11. Amiri F., Jacob B., Dkhar W. et al. Evaluation of mean glandular dose in relation to breast density in digital mammography // Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine. 2025. Vol. 56. P. 161. DOI: 10.1186/s43055-025-01586-y.
12. Bećirović H., Kunosić S., Halilović M. et al. Radiation Exposure of Patients in Mammography: An Overview of the 15-Year Practice. CMBEBIH 2021: Proceedings of the International Conference on Medical and Biological Engineering, CMBEBIH 2021, Mostar, Bosnia and Herzegovina, 21-24 April 2021. Cham: Springer, 2021. Vol. 84. P. 809-816. DOI: 10.1007/978-3-030-73909-6_92.
13. Warren L.M., Dance D.R., Young K.C. Radiation risk of breast screening in England with digital mammography // The British Journal of Radiology. 2016. Vol. 89 (1067). P. 20150897. DOI: 10.1259/bjr.20150897.
14. Du X., Yu N., Zhang Y., Wang J.T. The relationship of the mean glandular dose with compressed breast thickness in mammography // Journal of Public Health and Emergency. 2017. Vol. 1. P. 32. DOI: 10.21037/jphe.2017.03.10.
15. Bor D., Tukul S., Olgar T. et al. Investigation of mean glandular dose versus compressed breast thickness relationship for mammography // Radiation Protection Dosimetry. 2008. Vol. 129 (1-3). P. 160-164. DOI: 10.1093/rpd/ncn140.
16. Lalji U.C., Jeukens C.R., Houben I. et al. Evaluation of low-energy contrast-enhanced spectral mammography images by comparing them to full-field digital mammography using EUREF image quality criteria // European Radiology. 2015. Vol. 25 (10). P. 2813-2820. DOI: 10.1007/s00330-015-3695-2.
17. Sechopoulos I., Suryanarayanan S., Vedantham S. et al. Radiation dose to organs and tissues from mammography: Monte Carlo and phantom study // Radiology. 2008. Vol. 246 (2). P. 434-443. DOI: 10.1148/radiol.2462070256.

Поступила: 15.04.2026

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета. **Адрес для переписки:** 197101, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: vodovatofoff@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5191-7535, РИНЦ Author ID: 859255

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

Костина Ксения Евгеньевна – исполняющая обязанности младшего научного сотрудника лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; 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, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-4857-6792, РИНЦ Author ID: 653792

Горский Григорий Анатольевич – кандидат медицинских наук, заместитель директора по инновационной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева; доцент кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0001-7310-9718, РИНЦ Author ID: 656343

Лихун Дмитрий Александрович – начальник отдела надзора по радиационной гигиене Межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу и Ленинградской области, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Водоватов А.В., Косарлукова Е.А., Костина К.Е., Репин Л.В., Горский Г.А., Лихун Д.А. Дозы облучения пациентов при проведении цифровой маммографии в Санкт-Петербурге и Ленинградской области // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 34–42. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-34-42

Radiation doses for patients undergoing digital mammography in Saint Petersburg and Leningrad Region

Aleksandr V. Vodovatov^{1,2}, Elena A. Kosarlukova¹, Ksenia E. Kostina¹, Leonid V. Repin¹, Grigory A. Gorsky^{1,3}, Dmitry A. Likhun⁴

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

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

³ I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint Petersburg, Russia

⁴ Interregional Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing for the city of Saint Petersburg and the Leningrad Region, Saint Petersburg, Russia

The gold standard for early diagnosis of malignant breast neoplasms is mammography (X-ray examination of the breast) performed using digital and analogue X-ray units. This procedure is routinely conducted for all women aged 40 to 75 years on a regular basis (once every one or two years); mammography of both breasts is performed in two projections (four X-ray images). Doses from mammography, in accordance with the Norms of the Radiation Safety NRB 99/2009, shall not exceed 1 mSv per year. Hence, reliable assessment of patient doses for this procedure is important. The aim of this study was to evaluate the patient doses from mammographic procedures in medical facilities in St. Petersburg and the Leningrad Region. Materials and Methods: Data collection was performed at 99 medical facilities in St. Petersburg and the Leningrad Region for 141 digital mammography units during the period 2023–2025. For each mammography unit, mean glandular dose and effective dose was assessed for various compressed breast thicknesses (2, 4, 6, 8, and 10 cm) and projections (craniocaudal and mediolateral oblique), in accordance with the methodological guidelines MU 2.6.1.2944-11. Results and Discussion: The mean effective doses per single mammographic image in either the craniocaudal or mediolateral oblique projection varied from 0.05 to 0.07 mSv; effective doses per complete mammographic examination (two craniocaudal and two mediolateral oblique images) varied from 0.2 to 0.3 mSv. At the same time, substantial differences in patient dose ranges were observed: the ratio between the minimum and maximum mean glandular dose and effective dose reached up by the factor of 60, respectively. The primary factors determining patient exposure doses were the exposure and the X-ray tube output. No significant correlation was found between patient doses and tube voltage, focal-image distance, or the anode/filter combination. Compressed breast thickness also did not significantly influence the effective dose. Conclusion: Although the mean patient exposure levels during digital mammography are acceptable and comparable with international practice, patient doses for several mammography units are anomalously high. For such units, the implementation of patient radiation protection optimization measures is a priority.

Key words: digital mammography, effective dose, mean glandular dose, optimization, screening examinations.

Authors' personal contribution

Vodovatov A.V. developed the study design, defined the aims and objectives, prepared the final version of the manuscript.

Kosarlukova E.A. performed data analysis, edited the interim version of the manuscript.

Kostina K.E. performed data analysis, edited the interim version of the manuscript.

Repin L.V. performed data analysis, edited the interim version of the manuscript.

Gorsky G.A. organized the conduct of the studies in St. Petersburg and Leningrad Oblast, and edited the interim version of the article.

Likhun D.A. organized the conduct of the studies in St. Petersburg and Leningrad Oblast, and edited the interim version of the article.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The research was conducted within the framework of the scientific project titled «Scientific substantiation of the Concept for ensuring radiation safety of the population of the Russian Federation during modern radiological and X-ray procedures».

Aleksandr V. Vodovatov

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

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

References

1. Cancer today. GLOBOCAN. Available from: <https://gco.iarc.fr> [Accessed 06 April 2026].
2. Drapkina OM, Kaprin AD, Almazova II, Drozdova LYu, Ivanova ES, Rozhkova NI, et al. Screening of malignant neoplasms of the breast as part of the medical examination of certain groups of the adult population. Guidelines. *Pervichnaya mediko-sanitarnaya pomoshch = Primary Health Care (Russian Federation)*. 2024;1(1): 63-80. DOI: 10.15829/3034-4123-2024-5. (In Russian).
3. Breast cancer. World Health Organization. Available from: <https://www.who.int/ru> [Accessed 06 April 2026]. (In Russian).
4. Kaprin AD, Starinsky VV, Shakhzadova AO. Malignant neoplasms in Russia in 2023 (morbidity and mortality). Moscow: P. Hertsen Moscow Oncology Research Institute - a branch of National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation; 2024. 276 p.
5. Bontrager KL, Lampignano JP. Textbook of radiographic positioning and related anatomy. 8th ed. Mosby; 2014. 826 p.
6. Vodovatov AV. Improvement of radiation safety standards. Part 1. Appropriateness of the limitation of the medical exposure of healthy individuals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 115-124. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-115-124. (In Russian).
7. Hendrick RE. Radiation doses and cancer risks from breast imaging studies. *Radiology*. 2010;257(1): 246-253.
8. Hendrick RE, Pisano ED, Averbukh A, Moran C, Berns EA, Yaffe MJ, et al. Comparison of acquisition parameters and breast dose in digital mammography and screen-film mammography in the American College of Radiology Imaging Network digital mammographic imaging screening trial. *AJR. American Journal of Roentgenology*. 2010;194(2): 362-369. DOI: 10.2214/AJR.08.2114.
9. Sulieman A, Serhan O, Al-Mohammed HI, Mahmoud MZ, Alkhorayef M, Alonazi B, et al. Estimation of cancer risks during mammography procedure in Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2019;26(6): 1107-1111. DOI: 10.1016/j.sjbs.2018.10.005.
10. Baek JE, Kang BJ, Kim SH, Lee HS. Radiation dose affected by mammographic composition and breast size: first application of a radiation dose management system for full-field digital mammography in Korean women. *World Journal of Surgical Oncology*. 2017;15(1): 38. DOI: 10.1186/s12957-017-1107-6.
11. Amiri F, Jacob B, Dkhar W, Mustaffa SP, Kadavigere R, Pradhan A, et al. Evaluation of mean glandular dose in relation to breast density in digital mammography. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2025;56: 161. DOI: 10.1186/s43055-025-01586-y.
12. Bećirović H, Kunosić S, Halilović M, Lasić I, Galić S, Bajrović J. Radiation Exposure of Patients in Mammography: An Overview of the 15-Year Practice. In: Badnjević A, Gurbeta Pokvić L. (eds). *CMBEBIH 2021: Proceedings of the International Conference on Medical and Biological Engineering*, CMBEBIH 2021, 21-24 April 2021, Mostar, Bosnia and Herzegovina. Cham: Springer; 2021. Vol. 84. P. 809-816. DOI:10.1007/978-3-030-73909-6_92.
13. Warren LM, Dance DR, Young KC. Radiation risk of breast screening in England with digital mammography. *The British Journal of Radiology*. 2016;89(1067): 20150897. DOI: 10.1259/bjr.20150897.
14. Du X, Yu N, Zhang Y, Wang JT. The relationship of the mean glandular dose with compressed breast thickness in mammography. *Journal of Public Health and Emergency*. 2017;1: 32 DOI: 10.21037/jphe.2017.03.10.
15. Bor D, Tukul S, Olgar T, Toklu T, Aydin E, Akyol O. Investigation of mean glandular dose versus compressed breast thickness relationship for mammography. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008;129(1-3): 160-164. DOI: 10.1093/rpd/ncn140.
16. Lalji UC, Jeukens CR, Houben I, Nelemans PJ, van Engen RE, van Wylick E, et al. Evaluation of low-energy contrast-enhanced spectral mammography images by comparing them to full-field digital mammography using EUREF image quality criteria. *European Radiology*. 2015;25(10): 2813-2820. DOI: 10.1007/s00330-015-3695-2.
17. Sechopoulos I, Suryanarayanan S, Vedantham S, D'Orsi CJ, Karellas A. Radiation dose to organs and tissues from mammography: Monte Carlo and phantom study. *Radiology*. 2008;246(2): 434-443. DOI: 10.1148/radiol.2462070256.

Received: April 15, 2026

For correspondence: Aleksandr V. Vodovatov – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory of Radiation Hygiene of Medical Facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University (8, Mira Str., Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovattoff@gmail.com); ORCID: 0000-0002-5191-7535, RSCI Author ID: 859255

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

Ksenia E. Kostina – Acting Junior Researcher, Laboratory of Radiation Control, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0007-6476-9571

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, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-4857-6792, RSCI Author ID: 653792

Grigory A. Gorsky – Candidate of Medical Sciences, Deputy Director of the Innovation Work, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Docent, I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0001-7310-9718, RSCI Author ID: 656343

Dmitry A. Likhun – Head of the Radiation Hygiene Supervision Department of the Interregional Department of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing for the city of Saint Petersburg and Leningrad Region, Saint Petersburg, Russia

For citation: Vodovatov A.V., Kosarlukova E.A., Kostina K.E., Repin L.V., Gorsky G.A., Likhun D.A. Radiation doses for patients undergoing digital mammography in Saint Petersburg and Leningrad Region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 34–42. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-34-42

Риск смерти от злокачественных новообразований органов верхнего отдела желудочно-кишечного тракта в Уральской когорте аварийно-облученного населения

Микрюкова Л.Д., Завьялов Д.А.

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

Онкопатология является одним из основных отдаленных эффектов воздействия ионизирующего излучения. Проблема воздействия малых доз остается одной из наиболее сложных. Цель исследования – анализ дозовой зависимости риска смертности от злокачественных новообразований верхнего отдела желудочно-кишечного тракта у членов Уральской когорты аварийно-облученного населения с 1950 по 2020 год. Материалы и методы: Уральская когорта облученного населения включает в себя лиц, пострадавших в результате двух радиационных аварий на Южном Урале. Период наблюдения – 71 год, численность когорты на конец наблюдения – 62592 человека, число человеко-лет под риском – 1964136. Всего было установлено 1587 случаев злокачественных новообразований данной локализации, из них – 844 у мужчин, 743 – у женщин. В качестве реперной использовалась доза на желудок. Максимальная доза за весь период наблюдения составила 1,13 Гр, средняя – 0,04 Гр. Анализ проводился с использованием программ статистического пакета Erisure методом Пуассоновской регрессии с применением простой параметрической модели избыточного относительного риска. Значимость результатов оценивалась методом максимального правдоподобия с 95 % вероятностью. Результаты исследования и обсуждение: При анализе риска смертности всех злокачественных новообразований верхнего отдела пищеварительного тракта дозовая зависимость имела линейный характер и наблюдалась уже при двухлетнем минимальном латентном периоде: избыточный относительный риск составил 0,76/Гр ($p=0,03$). Дозовая зависимость смертности от злокачественных новообразований ротовой полости также имела линейный характер при двухлетнем минимальном латентном периоде, избыточный относительный риск на 1 Гр дозы составил 4,95 ($p=0,01$). Величины риска развития других злокачественных новообразований органов верхнего отдела желудочно-кишечного тракта не показали значимой зависимости от дозы на желудок. Проведена оценка влияния модифицирующих факторов на величину радиогенного риска. Заключение: По результатам проведенного исследования получен статистически значимый избыточный относительный риск смерти от всех злокачественных новообразований верхних отделов желудочно-кишечного тракта и от злокачественных новообразований ротовой полости.

Ключевые слова: избыточный относительный риск, канцерогенный риск, ионизирующее излучение, смертность, злокачественные новообразования.

Введение

В середине прошлого века произошли две аварии на производственном объединении «Маяк» в Челябинской области. Пострадали жители Челябинской, Курганской и Свердловской областей. Первая авария была связана с загрязнением реки Теча сбросами радиоактивных отходов с 1949 г. по 1956 г., вторая авария в результате которой образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) произошла из-за взрыва емкости-хранилища жидких радиоактивных отходов в 1957 году. Население подверглось внешнему и внутреннему облучению в разных дозах. В клиническом отделении Южно-Уральского Федерального научно-клинического центра медицинской биофизики ФМБА России организовано обследование и лечение пострадавшего населения. Благодаря научному наблюдению и длительному сбору информации (более 70 лет) о последствиях радиационных аварий была сформирована Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН) [1-3].

В результате воздействия ионизирующего излучения в отдаленном периоде по данным литературы наиболее часто регистрируются злокачественные новообразования [4-6]. Рак верхних отделов желудочно-кишечного тракта (ВОЖКТ), включающий злокачественные новообразования ротовой полости, пищевода, желудка, двенадцатиперстной кишки, печени, желчевыводящих путей и желчного пузыря, поджелудочной железы является одной из самых распространенных причин смертности от злокачественных новообразований (ЗНО) в мире, например, в США это вторая по значимости причина смертности от ЗНО [7]. В структуре смертности от рака в России онкологические заболевания системы пищеварения занимают также одно из ведущих мест, составляя 29,3 % [8]. В структуре заболеваемости в России одним из самых распространенных ЗНО является рак желудка – пятое место, в структуре смертности от злокачественных новообразований занимает 3-е место [9]. В структуре смертности рак пищевода в РФ занимает 6-е место [10]. Так как ЗНО верхних отделов желудочно-кишечного тракта имеют

Микрюкова Людмила Дмитриевна

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

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

высокую степень распространенности в структуре заболеваемости и смертности как во всем мире, так и в РФ, представляет интерес оценка влияния дозы и нерадиационных факторов на риск смертности ЗНО ВОЖКТ у населения, подвергнувшегося действию длительного хронического облучения. Достаточная численность когорты, длительный период наблюдения (с 1950 по 2020 год), расчет индивидуальных доз облучения дают возможность провести такой анализ в Уральской когорте аварийно-облученного населения.

Цель исследования – анализ дозовой зависимости риска смертности от злокачественных новообразований верхнего отдела желудочно-кишечного тракта у членов Уральской когорты аварийно-облученного населения с 1950 по 2020 год.

Материалы и методы

Для анализа дозовой зависимости смертности населения от ЗНО верхнего отдела пищеварительного тракта использовалась объединённая когорта лиц, облученных в результате двух аварий на ПО «Маяк» на Южном Урале. Период наблюдения 71 год (с 1950 по 2020 годы). Территория наблюдения за смертностью включала населенные пункты Челябинской и Курганской областей. Численность Уральской когорты аварийно-облученного населения на конец наблюдения (2020 г.) составила 62592 человека. По демографическим характеристикам 44 % состава когорты (27789 человек) составляли мужчины, 56 % (34803 человек) – женщины. По этническому составу преобладало славянское, преимущественно русское население и включало 45007 человек (72 %), группа татар и башкир включала 17585 человек (28 %). Облученные на реке Теча составили 68 % изучаемой когорты (42665 человек), облученные на ВУРСе – 32 % (19937 человек). По возрасту на начало облучения 52 % от состава когорты установлены в возрастной категории от 0 до 19 лет, 41 % - от 20 до 59 лет, только 7 % от состава когорты были старше 60 лет. На конец периода наблюдения 68 % от общего числа когорты умерли (34938 человек), причина смерти установлена у 31896 человек (91 %). Потери из-под наблюдения 5614 человек (11 %). 18 % изучаемой когорты составили мигранты.

Всего за изучаемый период было установлено 1587 случаев ЗНО ВОЖКТ. В таблице 1 показано распределение случаев по полу и по этнической принадлежности, а также распределение числа человеко-лет.

Таблица 1. Демографические характеристики случаев смерти от ЗНО верхнего отдела ЖКТ

[Table 1. Demographic characteristics of deaths from upper gastrointestinal cancer]

Характеристики [Characteristics]	Случаи ЗНО ВОЖКТ [Cancer cases]		
	Количество [n]	%	Человеко-годы [Person-years]
Мужчины [Male]	844	53	828209
Женщины [Female]	743	47	1135931
Татары и башкиры [Tatars & Bashkirs]	496	31	646474
Русские [Russian]	1091	69	1317666
Вся когорта [Whole cohort]	1587	100	1964140

Число лиц, умерших от ЗНО верхнего отдела ЖКТ, составило 1587 человек. У мужчин было зарегистрировано больше случаев ЗНО, чем у женщин (844 против 743 соответственно). По этническому составу 69 % от всех случаев зарегистрировано у русских (1091 случай), 31 % – у татар и башкир (496 случаев). Число человеко-лет под риском при проживании на территории наблюдения за смертностью у членов когорты, умерших от ЗНО ВОЖКТ, составило 1964140.

В таблице 2 показаны причины смерти от рака верхнего отдела ЖКТ по отдельным локализациям.

Таблица 2. Случаи смерти от ЗНО верхнего отдела ЖКТ в зависимости от локализации

[Table 2. Deaths from upper gastrointestinal cancers by site]

Локализация ЗНО ВОЖКТ [Cancer site]	Мужчины [Male]		Женщины [Female]		Всего [Whole cohort]	
	n	%	n	%	n	%
Ротовая полость [Oral cavity]	77	9	18	2	95	6
Пищевод [Esophagus]	126	15	97	13	223	14
Желудок [Stomach]	473	56	426	57	899	57
Печень, желчный пузырь и протоки [Liver, gallbladder and ducts]	86	10	120	16	206	13
Поджелудочная железа [Pancreas]	82	10	82	11	164	10
Все [All upper gastrointestinal tract]	844	100	743	100	1587	100

В структуре смертности от онкологических заболеваний верхнего отдела органов пищеварения у членов УКАОН максимальное количество случаев зарегистрировано от ЗНО желудка (57 %), далее идут ЗНО пищевода и печени (14 % и 13 % соответственно), 10 % составляют ЗНО поджелудочной железы, 6 % - ротовой полости. Злокачественные новообразования желудка являются самой частой локализацией ЗНО в верхнем отделе ЖКТ как у мужчин, так и у женщин (56 % и 57 % соответственно). Доля злокачественных новообразований пищевода и поджелудочной железы в процентном отношении по полу почти не отличается, а доля ЗНО печени у женщин больше (16 % против 10 % у мужчин).

Дозы

Население пострадавших территорий подверглось сочетанному облучению: внешнему в связи с повышенным уровнем и внутреннему за счет употребления продуктов питания и воды. Основными дозообразующими радионуклидами являлись долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs . Расчет доз в УКАОН за весь период наблюдения проведен на основе TRDS-2016, которая была разработана в биофизической лаборатории [11-13]. Чтобы оценить риск ЗНО ВОЖКТ была выбрана доза на желудок. Доза, накопленная в стенках желудка, была рассчитана на каждый год наблюдения. При расчете доз учитываются: история проживания человека на территории наблюдения за смертностью, 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}Sr , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru [13]. Максимальная доза на желудок за весь период наблюдения составила 1,13 Гр, средняя – 0,04 Гр.

Статистический анализ

В основе статистического анализа использован статистический пакет EPICURE (программа DATAB и AMFIT) [14].

Анализ риска смерти от ЗНО ВОЖКТ проводился с использованием простой параметрической модели избыточного относительного риска (ИОР) на основе Пуассоновской регрессии в AMFIT статистического пакета Epicure [14].

Модель ИОР представлена формулой:

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

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 (λ_0);

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

В перечень анализируемых факторов вошли: пол, возраст начала облучения (категории по 20 лет от 0 до 60+), этническая принадлежность (русские или татары и башкиры), факт эвакуации, территория первого облучения (река Теча или ВУРС), статус облучения (облучен после рождения, дополнительно облучен внутриутробно или дополнительно облучены родители), наличие рака у родственников (да, нет, неизвестно), курение (курит, не курит или бросил, не известно), территория проживания (сельская местность или город), достигнутый возраст (категории по 20 лет от 0 до 80+), календарный период (до 1986 г. и после), год рождения членов когорты (до 1935 г. и после), дозовые категории с латентным периодом 0, 2, 5, 10 и 15 лет (с нижней границей 0; 0,002; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 > Гр).

Сначала была проведена оценка базовых уровней факторов риска, оказывающих влияние на смертность от ЗНО ВОЖКТ, а затем анализ дозовой зависимости смертности ЗНО ВОЖКТ.

Оценка базовых уровней

Влияние параметров на уровни смертности от всех ЗНО ВОЖКТ и по отдельным локализациям, относящимся к верхнему отделу ЖКТ, было проверено как дифференцированно, так и в различных сочетаниях. Для расчета базовых уровней смертности были выбраны только факторы, оказывающие статистически значимое влияние на них (как при расчете значения ИОР по всем органам ВОЖКТ, так и по отдельным причинам смерти от ЗНО, относящимся к этой группе).

При расчете величины ИОР смертности всех ЗНО ВОЖКТ было установлено влияние следующих факторов: показатель смертности был выше у мужчин относительно женщин, у курящих выше, чем у некурящих или бросивших курить, у сельских жителей выше, чем у городских, выше у кого есть рак у родственников, у неэвакуированных выше, чем у эвакуированных, у родившихся до 1935 г. выше, чем у родившихся после 1935 г., и показатели увеличивались

с увеличением достигнутого возраста.

В модель базовых уровней смертности ИОР ЗНО ротовой полости кроме значимых показателей: пол (показатели выше у мужчин), курение (выше у курящих), достигнутый возраст (увеличивались с увеличением достигнутого возраста) были также добавлены факторы - территория первого облучения (выше у облученных на реке), календарный период (выше до 1986 года). Остальные показатели в модели базовых уровней смертности этой локализации не включены, т. к. были не значимы.

Результаты и обсуждение

Проблема воздействия малых доз остается одной из наиболее сложных. Прежде всего потому, что при оценке последствий радиационных катастроф, в результате которых пострадало население, на популяционном уровне играют роль сложности связаны с количественной оценкой малых доз облучения населения. Серьезные методические трудности возникают при выделении радиационной составляющей среди экологически неблагоприятных факторов, других нерадиационных факторов риска различной природы, воздействующих на человека. В особенности ценными могут быть эпидемиологические исследования, полученные на популяциях, получивших не только внешнее облучение, но и внутреннее (например, при поступлении радионуклидов внутрь с пищей и водой) или комбинированное облучение, а также облучение в течение продолжительных периодов времени.

Учитывая доказанное канцерогенное влияние ионизирующего излучения и относительно высокую смертность от злокачественных новообразований верхнего отдела органов пищеварительной системы изучение закономерностей смертности и рисков смерти ЗНО данных локализаций в облученных популяциях представляется важной задачей.

В развитии злокачественного новообразования существует период с опухолевого повреждения одной клетки до развития клинически выраженного заболевания – латентный период. Для уточнения минимального латентного периода (МЛП) развития ЗНО ВОЖКТ при расчете величин ИОР смертности в зависимости от дозы облучения на каждого человека и на каждый календарный год были рассчитаны дозы с минимальным латентным периодом развития ЗНО ВОЖКТ в 2, 5, 10 и 15 лет. Были протестированы линейная, квадратичная и линейно-квадратичная модели дозовой зависимости ИОР.

В таблице 3 показаны результаты анализа ИОР смертности от всех ЗНО ВОЖКТ в зависимости от минимального латентного периода и вида дозовой зависимости.

Значимые величины ИОР были получены при 0- и 2-летнем минимальном латентном периоде в линейной модели. При этом величина ИОР и доверительные интервалы отличаются незначительно, $p=0,03$ в обеих моделях, отклонение модели чуть меньше при минимальном латентном периоде равно 2 годам. Увеличение минимального латентного периода до 5, 10 или 15 лет приводило к увеличению неопределенности оценки ИОР. Учитывая, что минимальный латентный период необходим для развития злокачественного новообразования, то для дальнейшего анализа и расчетов модификации риска нерадиационными факторами нами была использована доза с минимальным латентным периодом в 2 года. Величина ИОР при этом составила 0,76/Гр (95 % ДИ: 0,07;1,60), $p=0,03$.

Таблица 3. ИОР смертности ЗНО ВОЖКТ при различных минимальных латентных периодах (линейная и квадратичная модели)
[Table 3. ERR values of mortality from all upper gastrointestinal cancers depending on the stomach dose (linear and quadratic models)]

Минимальный латентный период, лет [Minimal latent period, years]	ИОР/Гр, 95 % ДИ [ERR/Gy (95 % CI)]	p	Отклонение модели [Deviance]	Избыточные ЗНО [Excess cases]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
Линейная модель [Linear model]					
0	0,73 (0,06;1,55)	0,03	12548,80	52,9	3,3
2	0,76 (0,07;1,60)	0,03	12548,58	53,4	3,4
5	0,64 (-0,03;1,47)	0,06	12549,99	43,6	2,7
10	0,21 (-0,45;0,87)	>0,5	12552,99	13,5	0,9
Квадратичная модель [Quadratic model]					
0	0,92 (-0,36;2,20)	0,15	12551,37	16,4	1,0
2	0,90 (-0,39;2,19)	0,18	12551,62	15,5	1,0
5	0,64 (-0,63;1,91)	0,34	12552,51	10,5	0,7

Дозовая зависимость лучше всего описывалась линейной моделью ($p=0,03$). В квадратичной ($p=0,15$) и линейно-квадратичной ($p>0,5$, данные в таблице не приводятся) моделях величины ИОР были незначимыми. Отношение доли избыточных случаев ЗНО ВОЖКТ, рассчитанных по модели, к общему числу злокачественных новообразований верхнего отдела ЖКТ в когорте показывает величину атрибутивного риска. Атрибутивный риск для ЗНО ВОЖКТ в линейной модели с минимальным латентным периодом в 2 года составил 3,4 %, и, следовательно, 53 из 1587 случаев ЗНО ВОЖКТ могли быть результатом воздействия ионизирующей радиации.

Такой же анализ был проведен для ЗНО отдельных органов ЖКТ.

Анализ риска ЗНО ротовой полости представлен в таблице 4. При расчете величины ИОР была получена статистически значимая положительная величина при минимальном латентном периоде 0, 2,5 и 10 лет. Лучшие показатели для величины риска в линейной модели наблюдались при 0- и 2-летнем МЛП и были очень близки. Т.к. для реализации развития злокачественного новообразования нужен латентный период мы использовали величину ИОР с 2-летним минимальным латентным периодом, которая для ЗНО ротовой полости составила 4,95/Гр (95 % ДИ: 0,81; 12,49), $p=0,01$. Согласно линейной модели с минимальным латентным периодом в 2 года атрибутивный риск для ЗНО ротовой полости составил 15,3 %.

Таблица 4. ИОР смертности ЗНО ротовой полости при различных минимальных латентных периодах
[Table 4. ERR of mortality from oral cavity cancers depending on the stomach dose (linear and quadratic models)]

Минимальный латентный период, лет [Minimal latent period, years]	ИОР/Гр, 95 % ДИ [ERR/Gy (95 % CI)]	p	Отклонение модели [Deviance]	Избыточные ЗНО [Excess cases]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
Линейная модель [Linear model]					
0	5,17 (0,94;12,94)	0,01	1184,42	15,3	16,1
2	4,95 (0,81;12,49)	0,01	1184,91	14,5	15,3
5	4,10 (0,31;11,05)	0,03	1186,59	12,1	12,8
10	4,14 (0,31;11,20)	0,03	1186,62	11,7	12,3
Квадратичная модель [Quadratic model]					
0	9,04 (0,68;24,92)	0,03	1186,54	6,4	6,7
2	8,79 (0,39;24,89)	0,04	1187,03	6,1	6,4
5	7,13 (-0,37;22,13)	0,07	1188,18	4,9	5,2

Более высокая оценка риска для локализаций ЗНО ротовой полости в сравнении со всеми ЗНО ВОЖКТ сопровождается и большей неопределенностью, доверительный интервал, составил от 0,81 до 12,49. При тестировании квадратичной модели также получены положительные значения ИОР, но доверительный интервал при этом еще шире по сравнению

с линейной моделью. Тестирование линейно-квадратичной модели не выявило дозовой зависимости и в таблице 4 не приводится.

В таблице 5 показаны результаты анализа по отдельным локализациям ЗНО органов верхнего отдела ЖКТ по линейной модели с 2- и 5-летними минимальными латентными периодами.

Таблица 5. ИОР смертности ЗНО ВОЖКТ разных локализаций

[Table 5. ERR of mortality from upper gastrointestinal cancers depending on the stomach dose by site (linear model)]

Локализация ЗНО [Cancer site]	Случаи [Cases]	Минимальный латентный период 2 года [Minimal latent period 2 years]		Минимальный латентный период 5 лет [Minimal latent period 5 years]	
		ИОР/Гр (95 % ДИ)	p	ИОР/Гр (95 % ДИ)	p
Ротовая полость [Oral cavity]	95	4,95 (0,81; 12,49)	0,01	4,10 (0,31; 11,05)	0,03
Пищевод [Esophagus]	223	1,54 (-0,93; 4,00)	0,19	2,17 (-0,25; 6,29)	0,09
Желудок [Stomach]	899	0,68 (-0,28; 1,64)	0,13	0,567 (-0,38; 1,51)	0,20
Печень, желчный пузырь и протоки [Liver, gallbladder and ducts]	206	-0,13 (-1,55; 1,29)	> 0,5	-0,17 (-1,59; 1,26)	> 0,5
Поджелудочная железа [Pancreas]	164	0,87 (-1,27; 3,01)	0,36	0,66 (-1,40; 2,71)	0,49
Печень, желчный пузырь и протоки + поджелудочная железа [Liver, gallbladder and ducts + pancreas]	370	-0,07 (-1,21; 1,07)	> 0,5	-0,20 (-1,30; 0,90)	> 0,5
Все органы ВОЖКТ [All upper gastrointestinal tract]	1587	0,76 (0,07; 1,60)	0,03	0,64 (-0,03; 1,47)	0,06

Также был проведен анализ риска смерти от ЗНО пищевода, желудка, печени, поджелудочной железы и совместно печени и поджелудочной железы. Не было выявлено статистически значимой дозовой зависимости для ЗНО указанных органов по отдельности.

По данным в таблице 5 можно видеть, что значимая линейная дозовая зависимость наблюдается только для ЗНО ротовой полости ($p=0,01$) и для всех ЗНО ВОЖКТ ($p=0,03$). Квадратичная и линейно-квадратичные модели не выявили значимой дозовой зависимости смертности ЗНО для других локализаций и здесь не приводятся.

Модификация дозового ответа

В работе с использованием программы AMFIT у членов исследуемой УКАОН была проведена оценка возможной модификации дозового ответа различными нерадиационными факторами. Модификация дозового ответа проводилась путем расчета дозовой зависимости в разных группах, объединенных каким-либо общим признаком. Достаточная численность когорты и длительный период наблюдения позволили получить статистически значимые значения ИОР для отдельных групп и провести их корректное сравнение. Результаты оценки модификации ИОР для смертности ЗНО всех органов ВОЖКТ по линейной модели с минимальным латентным периодом 2 года представлены в таблице 6.

Таблица 6. Модификация ИОР смертности ЗНО ВОЖКТ

[Table 6. ERR modification of mortality from all upper gastrointestinal cancers]

Параметры [Parameters]	Количество [n]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95 % ДИ [95 % CI]		p
			Нижняя граница [Lower]	Верхняя граница [Upper]	
Вся когорта [Whole cohort]	1587	0,76	0,07	1,60	0,03
Этническая принадлежность [Ethnicity]					
Татары/башкиры [Tatars and Bashkirs]	496	1,33	0,30	2,57	0,02
Русские [Russian]	1091	0,44	-0,33	1,21	0,26

Параметры [Parameters]	Количество [n]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95 % ДИ [95 % CI]		p
			Нижняя граница [Lower]	Верхняя граница [Upper]	
Пол [Sex]					
Мужчины [Male]	844	0,48	-0,41	1,38	0,29
Женщины [Female]	743	1,08	0,11	2,33	0,05
Облучение родителей [Parental exposure]					
Не облучены [Not exposed]	1480	0,75	0,07	1,59	0,04
Облучены [Exposed]	107	-0,14	-3,48	3,20	> 0,5
Территория первого облучения [First exposure accident]					
Река Теча [Techa river]	1144	0,76	0,07	1,60	0,04
ВУРС [EURT]	443	0,69	-3,28	4,65	> 0,5
Городской/сельский житель [Urban/Rural]					
Сельский [Rural]	1326	0,71	0,01	1,58	0,07
Город [Urban]	261	1,19	-0,83	3,20	0,29
Календарный период [Calendar period]					
1956-1985	808	0,98	0,10	2,08	0,05
1986-2020	779	0,50	-0,40	1,40	0,27
Рак у родственников [Cancer in relatives]					
Нет [No]	812	0,88	-0,19	1,94	0,11
Есть [Yes]	621	0,61	-0,31	1,54	0,19
Нет информации [No information]	154	1,20	-1,70	4,09	0,49
Возраст начала облучения, лет [Age at exposure]					
10	–	0,21	-0,24	0,66	0,36
40	–	0,85	-0,07	1,77	0,07

По данным таблицы 6 в большинстве сравниваемых групп значимая зависимость величины ИОР наблюдалась только для представителей одной группы, поэтому корректное сравнение дозовой зависимости в рассматриваемых группах на данном этапе не представляется возможным. В целом наблюдалась статистически значимая дозовая зависимость показателя ИОР смерти от ЗНО ВОЖКТ в группе татар и башкир (ИОР/Гр=1,33; 95 % ДИ: 0,30; 2,57), $p=0,02$; а также для женщин (ИОР/Гр=1,08; 95 % ДИ: 0,11; 2,33), $p=0,05$; у членов когорты (представляющих большинство), родители которых не облучены ($p=0,04$); у облученных на реке Тече ($p=0,04$); у заболевших в первые 35 лет (до 1986 г.) после начала облучения.

При изучении параметра возраст начала облучения был получен значимый линейный тренд – риск увеличивался с возрастанием возраста начала облучения, но разницы между точечными оценками риска в 10 и 40 лет нет (табл. 6).

Не было выявлено статистически значимой модификации ИОР для всех ЗНО ВОЖКТ фактором наличия рака у родственников. Другие незначимые факторы в таблице не представлены.

Была проведена оценка возможной модификации значимых значений ИОР смертности ЗНО ротовой полости

нерадиационными факторами в УКАОН. Полученные оценки ИОР с данными факторами имели большие неопределенности, поэтому сделать вывод об их влиянии на величину дозовой зависимости в настоящее время не представилось возможным, и они не приводятся.

По литературным данным результаты подобных исследований на данный момент неоднозначны и противоречивы. Так, в последнем обновлении оценок риска смерти от солидных ЗНО отдельных локализаций в объединенной когорте работников атомной промышленности Франции, Великобритании и США (INWORKS) ЗНО ротовой полости, желудка, пищевода, печени и поджелудочной железы в сумме составляют 23,6 % от всех смертей от ЗНО. В результате анализа авторы находят положительную связь накопленной дозы со смертями от ЗНО желудка, поджелудочной железы (ИОР/Гр 1,00 (-0,13; 2,47) и ИОР/Гр 0,06 (-0,80; 1,22) соответственно) и не находят или находят негативную ассоциацию с ЗНО печени, ротовой полости и пищевода [15].

В когорте работников ПО «Маяк» получен статистически значимый относительный риск заболеваемости раком желудка 1,48 (95 % ДИ: 1,10; 1,98) при поглощенной в стенке желудка дозе внешнего гамма-излучения более 1,0 Гр [16].

Также в этой когорте была выявлена статистически значимая положительная зависимость между поглощенными в печени дозами внутреннего альфа-излучения от инкорпорированного плутония-239 и риском ЗНО печени [17–18].

В исследовании заболеваемости и смертности от ЗНО пищеварительной системы у ликвидаторов аварии на ЧАЭС в период с 1986 по 1997 год авторы отмечают, что показатели стандартизованных отношений заболеваемости и смертности, а также статистически не значимые радиационные риски, не позволяют сделать вывод о влиянии радиационного фактора на заболеваемость и смертность от данного класса заболеваний. Также авторы указывают на то, что для уточнения данных оценок необходим более длительный период наблюдения [19].

В обзоре посвященном смертности от раковых и нераковых заболеваний в японской когорте выживших после ядерной бомбардировки (LSS) авторы отмечают статистически значимый избыточный относительный риск смерти от ЗНО желудка, пищевода и печени (ИОР/Гр 0,28 (0,14; 0,42), ИОР/Гр 0,51 (0,11; 1,06) и ИОР/Гр 0,36 (0,18; 0,58) соответственно) [20].

Заключение

В работе представлены результаты продолжающегося исследования радиационных эффектов в когорте, объединяющей население, облученное в период с 1950 по 1960 г. в двух радиационных инцидентах на Южном Урале. Впервые было проведено исследование показателей риска смертности ЗНО органов верхнего отдела пищеварительного тракта (ротовой полости, пищевода, желудка, поджелудочной железы, печени, желчевыводящих путей и желчного пузыря), в Уральской когорте аварийно-облученного населения за 71-летний период наблюдения от дозы и нерадиационных факторов. Для анализа использованы дозы, накопленные в желудке за весь период наблюдения (с 1950 по 2020 год), рассчитанные по TRDS-2016.

Ранее в когорте УКАОН был проведен анализ риска заболеваемости ЗНО верхнего отдела органов пищеварения [21]. Дозовая зависимость для заболеваемости ЗНО желудка имела линейный характер и наблюдалась при двухлетнем минимальном латентном периоде: ИОР составил 0,98/Гр (95 % ДИ: 0,09; 2,10), $p=0,029$. Для заболеваемости всех ЗНО ВОЖКТ была получена положительная линейная дозовая зависимость с 90 % значимостью ИОР=0,58/Гр (95 % ДИ: -0,03; 1,31; 90 % ДИ: 0,06; 1,19).

В проведенном исследовании по результатам анализа дозовой зависимости риска смертности от всех злокачественных новообразований верхних отделов ЖКТ в когорте лиц, подвергшихся хроническому радиационному воздействию на Южном Урале было показано, что для всех ЗНО ВОЖКТ дозовая зависимость имела линейный характер и наблюдалась уже при двухлетнем минимальном латентном периоде: ИОР составил 0,76/Гр (95 % ДИ: 0,07; 1,60), $p=0,03$. Положительные оценки риска развития ЗНО были получены для нескольких органов верхнего отдела пищеварительной системы - ротовая полость, пищевод, желудок, поджелудочная железа, но значимой дозовой зависимости была только для ротовой полости. Дозовая зависимость смертности ЗНО ротовой полости имела линейный характер при МЛП=2, ИОР на 1 Гр дозы составил 4,95 (95 % ДИ: 0,81; 12,49), $p=0,01$.

Величины риска развития ЗНО всех других органов пищеварительной системы не показали значимой дозовой зависимости от дозы на желудок.

Была проведена оценка возможной модификации величины риска смертности ЗНО всех органов ВОЖКТ и отдельно ЗНО ротовой полости нерадиационными факторами (пол, этническая принадлежность, принадлежность к облученному населению в населенных пунктах на реке Тече/ВУРСа, облучение родителей, курение, городской житель/сельский житель, наличие ЗНО у родственников первой линии родства, период наблюдения, достигнутый возраст, возраст начала облучения). Статистически значимая связь величины ИОР смертности с дозой для всех ЗНО ВОЖКТ в УКАОН была получена в группе татар и башкир, у женщин, при отсутствии облучения родителей, у облученных на реке Теча, у жителей села, в календарный период до 1986 г. При этом достоверных различий в группах не наблюдалось. Был получен значимый линейный тренд – риск увеличивался с возрастанием возраста начала облучения.

При оценке возможной модификации эффектов ИОР смертности ЗНО ротовой полости нерадиационными факторами полученные значения ИОР имели большие неопределенности, поэтому сделать вывод об их влиянии на величину дозовой зависимости на данном этапе не представилось возможным.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

Завьялов Д.А. – анализ риска, обсуждение результатов, подготовка таблиц.

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам ЮУрФНКЦ МБ: Е.А. Шишкиной, Е.И. Толстых, за расчет оценок индивидуальных доз для членов когорты; сотрудникам группы информационной поддержки исследований населения под руководством Тряпициной С.В. за сбор информации о местах проживания, жизненном статусе и причинах смерти членов когорты; сотрудникам научно-исследовательской лаборатории исследований эффектов облучения населения и лично Епифановой С.Б. за подготовку данных к анализу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. Аклев А.В., Аклев А.А., Андреев С.С. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Челябинск: Книга, 2016. 390 с.
2. Аклев А.В., Киселев М.Ф. Восточно-Уральский радиоактивный след (сборник статей, посвященных последствиям аварии 1957 г. на ПО «Маяк»). Челябинск, 2012. 352 с.

3. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев В.Н., Аклеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. № 3. С. 393–402.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report. Annex A. Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. 13-322. United Nations: New York, 2008.
5. 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.
6. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. и др. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017 // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 6–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
7. Liang J., Rastegar R., El Helou M. et al. Incidence Trends in Upper Gastrointestinal Cancer in Young Adults: A Nationwide Time-Trend Analysis Using 2001-2019 US Cancer Statistics Databases // The American journal of gastroenterology. 2025 Vol. 120, No 4. P. 890-904. DOI: 10.14309/ajg.0000000000003068.
8. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность). Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: Филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019.
9. Клинические рекомендации – Рак желудка – 2020-2021-2022 (31.01.2023) – Утверждены Минздравом РФ. URL: http://disuria.ru/load/zakonodatelstvo/klinicheskie_rekomendacii_protokoly_lechenija/54 / (Дата обращения: 01.10.2025).
10. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries // CA: A Cancer Journal for Clinicians. 2021. Vol. 71, No 3. P. 209-249. DOI: 10.3322/caac.21660.
11. Дегтева М.О., Напье Б.А., Толстых Е.И. и др. Распределение индивидуальных доз в когорте людей, облученных в результате радиоактивного загрязнения реки Течи // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, № 3. С. 46–53. DOI: 10.12737/article_5cf2364cb49523.98590475.
12. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstikh 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. 378–87. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
13. Shishkina E.A., Napier B.A., Preston D.L. et al. Dose estimates and their uncertainties for use in epidemiological studies of radiation-exposed populations in the Russian Southern Urals // PLOS One. 2023. Vol. 18, No 8. DOI: 10.1371/journal.pone.0288479.
14. Preston D.L., Lubin J., Pierce D., McConney. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Company, 1993.
15. Richardson D.B., Laurier D., Leuraud K. et al. Site-specific cancer mortality after low-level exposure to ionizing radiation: findings from an update of the International Nuclear Workers Study (INWORKS) // American Journal of Epidemiology. 2025. Vol. 194, No 5. P. 1285-1294. DOI: 10.1093/aje/kwae256.
16. Жунтова Г.В., Григорьева Е.С., Азизова Т.В. Риск заболеваемости раком желудка у работников радиационно опасного предприятия // Анализ риска здоровью. 2019. № 1. С. 40–49. DOI: 10.21668/health.risk/2019.1.04.
17. Labutina E.V., Kuznetsova I.S., Hunter N. et al. Radiation risk of malignant neoplasms in organs of main deposition for plutonium in the cohort of Mayak workers with regard to histological types // Health Physics. 2013. Vol. 105, No 2. P. 165-176. DOI: 10.1097/HP.0b013e31828f57df.
18. Sokolnikov M.E., Gilbert E.S., Preston D.L. et al. Lung, liver and bone cancer mortality in Mayak workers // International Journal of Cancer. 2008. Vol. 123, No 4. P. 905-911. DOI: 10.1002/ijc.23581.
19. Бирюков А.П., Иванова И.Н., Горский А.И. и др. Анализ заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований пищеварительной системы среди ликвидаторов за 1986-1997 годы // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2001. № 12. С. 62-81.
20. 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. 229-43. DOI: 10.1667/rr2629.1.
21. Крестинина Л.Ю., Завьялов Д.А. Риск развития злокачественных новообразований органов пищеварения, исключая кишечник, в Уральской когорте аварийно-облученного населения // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 18–28. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-18-28.

Поступила: 07.11.2025

Микрюкова Людмила Дмитриевна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории исследований эффектов облучения населения, Южно-Уральский Федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, д. 68-А; E-mail: mikludm@mail.ru; ORCID: 0000-0002-6269-5114, РИНЦ Author ID: 726108

Завьялов Данила Александрович – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории исследований эффектов облучения населения, Южно-Уральский Федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия; ORCID: 0009-0005-8754-1655, РИНЦ Author ID: 1177673

Для цитирования: Микрюкова Л.Д., Завьялов Д.А. Риск смерти от злокачественных новообразований органов верхнего отдела желудочно-кишечного тракта в Уральской когорте аварийно-облученного населения // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 43–52. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-43-52

Mortality risk due to upper gastrointestinal cancers in Southern Urals population exposed to radiation cohort

Ludmila D. Mikryukova, Danila A. Zavyalov

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

Cancer is one of the major late effects of exposure to ionizing radiation. Low dose effect has been still remains one of the most challenging issues. The objective of the study is to analyze the dose dependence of the risk of upper gastrointestinal cancer mortality in members of the Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort over the period from 1950 to 2020. Materials and Methods: Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort includes people aggrieved as a result of two radiation accidents in the Southern Urals. Follow up period is 71 years, cohort size at the end of the follow up is 62,259 individuals, number of person-years at risk – 1964,136. In total 1,587 upper gastrointestinal cancers have been revealed, 844 of them were found in men, and 743 – in women. Dose to the stomach was used as the reference one. Maximum dose over the whole follow up period made up 1.13 Gy, mean dose – 0.04 Gy. Statistical analysis has been performed with the Epicure software package using the Poisson regression with simple parametric model of the excess relative risk. Maximum likelihood method with 95 % probability was applied to evaluate the statistical significance of the results. Results and Discussion: The analysis of the mortality risk of all the upper gastrointestinal cancers revealed linear dose relationship which started to be observed already with 2-year minimum latency period: ERR 0.76/Gy, $p=0.03$. Dose dependence of the mortality from oral cavity cancer was also linear with 2-year minimum latency period, ERR/Gy was 4.95, $p=0.01$. The risk of the development of upper gastrointestinal cancers did not exhibit statistically significant dependence on dose to the stomach. The effect of modifying factors per unit of radiogenic risk has also been evaluated. Conclusion: Based on the results of the study, a statistically significant excess relative mortality risk of all cancers of the upper gastrointestinal and oral cavity has been obtained.

Key words: excess relative risk, carcinogenic risk, ionizing radiation, mortality, cancer.

Authors' personal contribution

Mikryukova L.D. – study design, risk analysis, data interpretation, writing the manuscript, revision of the final version of the article

Zavyalov D.A. – risk analysis, discussion of results, preparation of tables.

Acknowledgements

We express our gratitude to the staff of the SUFRCC MB: E.A. Shishkina, E.I. Tolstykh for calculating estimates of individual doses for the cohort members; to the staff of the research data support for population studies headed by S.V. Tryapitsina for collecting information on places of residence, vital status, and causes of death of cohort members; to the staff of the R&D laboratory for studies of population exposure effects and personally to S.B. Epifanova 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 until 2030".

References

1. Akleyev AV, Akleyev AA, Andreyev SS. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Chelyabinsk: Kniga; 2016. 390 p. (In Russian).
2. Akleyev AV, Kiselev MF. The East Ural Radioactive Trace (a collection of articles on the consequences of the 1957 accident at the Mayak Production Association). Chelyabinsk; 2012. 352 p. (In Russian).
3. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev VN, Akleyev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Emergency medicine*. 2019;(3): 393–402. (In Russian).
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report. Annex A. Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. 13-322. United Nations: New York; 2008.
5. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31 (In Russian).
6. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 6–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17. (In Russian).
7. Liang J, Rastegar R, El Helou M, Mathur K, Larson BK, Waters K, et al. Incidence Trends in Upper Gastrointestinal Cancer in Young Adults: A Nationwide Time-Trend Analysis Using 2001–2019 US Cancer Statistics Databases. *The American journal of gastroenterology*. 2025;120(4): 890–904. DOI: 10.14309/ajg.0000000000003068.
8. Malignant neoplasms in Russia in 2023 (morbidity and mortality) / Ed. by Kaprin AD 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. 2019. 250 p. (In Russian).

Lyudmila D. Mikryukova

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

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

9. Clinical guidelines - Gastric cancer - 2020-2021-2022 (31.01.2023). Approved by the Russian Ministry of Health (In Russian). URL: http://disuria.ru/load/zakonodatelstvo/klinicheskie_rekomendacii_protokoly_lecheniya/54 / [Accessed 01.10.2025].
10. Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2021;71(3): 209-249. DOI: 10.3322/caac.21660.
11. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Bougrov NG, Krestinina LY, et al. Individual Dose Distribution in Cohort of People Exposed as a Result of Radioactive Contamination of the Techa River. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2019;64(3): 46-53. DOI: 10.12737/article_5cf2364cb49523.98590475. (In Russian).
12. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AY, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose from Environmental Exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
13. Shishkina EA, Napier BA, Preston DL, Degteva MO. Dose estimates and their uncertainties for use in epidemiological studies of radiation-exposed populations in the Russian Southern Urals. *PLOS One*. 2023;18(8): e0288479. DOI: 10.1371/journal.pone.0288479.
14. Preston DL, Lubin J, Pierce D, McConney. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993.
15. Richardson DB, Laurier D, Leuraud K, Gillies M, Haylock R, Kelly-Reif K, et al. Site-specific cancer mortality after low-level exposure to ionizing radiation: findings from an update of the International Nuclear Workers Study (INWORKS). *American Journal of Epidemiology*. 2025;194(5): 1285-1294. DOI: 10.1093/aje/kwae256.
16. Zhuntova GV, Grigoreva ES, Azizova TV. Risk of morbidity with stomach cancer among workers employed at radiation-hazardous enterprise. *Health Risk Analysis*. 2019;1: 40-49. DOI: 10.21668/health.risk/2019.1.04. (In Russian).
17. Labutina EV, Kuznetsova IS, Hunter N, Harrison J, Koshurnikova NA. Radiation risk of malignant neoplasms in organs of main deposition for plutonium in the cohort of Mayak workers with regard to histological types. *Health Physics*. 201;105(2): 165-176. DOI: 10.1097/HP.0b013e31828f57df.
18. Sokolnikov ME, Gilbert ES, Preston DL, Ron E, Shilnikova NS, Khokhryakov VV, et al. Lung, liver and bone cancer mortality in Mayak workers. *International Journal of Cancer*. 2008;123(4): 905-911. DOI: 10.1002/ijc.23581.
19. Biryukov AP, Ivanova IN, Gorsky AI, Petrov AV, Matyash VA. Analysis of incidence and mortality for malignant neoplasms of the digestive system among the liquidators in 1986-1997. *Radiatsia i risk (Byulleten Natsionalnogo radiatsionno-epidemiologicheskogo registra) = Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)*. 2001;12: 62-81. (In Russian).
20. 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.
21. Krestinina LY, Zavyalov DA. The risk of developing cancer of the digestive organs (excluding intestines) in the South Urals Population Exposed to Radiation Cohort. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 18-28. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-18-28.

Received: November 07, 2025

For correspondence: Lyudmila D. Mikryukova – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher and Head of the R&D Laboratory for Studies of Population Exposure Effects, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics Federal Medical-Biological Agency (68A Vorovsky Str., Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: mikludm@mail.ru); ORCID: 0000-0002-6269-5114, RSCI Author ID: 726108

Danila A. Zavyalov – Junior Researcher of the R&D Laboratory for Studies of Population Exposure Effects, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics, Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia; ORCID: 0009-0005-8754-1655, RSCI Author ID: 1177673

For citation: Mikryukova L.D., Zavyalov D.A. Mortality risk due to upper gastrointestinal cancers in Southern Urals population exposed to radiation cohort. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 43–52. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-43-52

Радиационная обстановка на рабочих местах персонала при обращении с радиоактивными отходами на предприятиях атомного судостроения и судоремонта

Арефьева Д.В., Грабский Ю.В., Балтрукова Т.Б., Петушок А.В.

Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины
Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия

Актуальность исследования обусловлена активным развитием судостроительной отрасли России, в том числе предприятий атомного судостроения и судоремонта, на которых образуются радиоактивные отходы. Рост объемов работ с радиоактивными отходами повышает риск увеличения доз облучения персонала, что требует комплексной оценки радиационной обстановки и совершенствования системы радиационного контроля. Цель работы — оценить радиационную обстановку на рабочих местах персонала при обращении с радиоактивными отходами и определить приоритетные направления улучшения системы радиационного контроля. Материалы и методы: Оценка состояния радиационной обстановки выполнена на основе материалов производственного контроля предприятия и данных натурных исследований. Измерения параметров проводились по аттестованным методикам выполнения измерений. Все используемые средства измерений проходили метрологический контроль в установленные сроки. Результаты исследования и обсуждение: Результаты показали, что основные радиационные факторы, определяющие условия труда персонала — внешнее гамма-излучение и радиоактивное загрязнение рабочих поверхностей бета-излучающими радионуклидами (фиксированное и снимаемое). Установлено неравномерное распределение дозовых нагрузок на организм при выполнении различных этапов работ по обращению с радиоактивными отходами. На рабочих местах участков по переработке жидких и твердых радиоактивных отходов уровни гамма-излучения превышают уровни излучения на других рабочих местах, однако средние значения индивидуальных доз облучения персонала не превышают предела доз для персонала и имеют тенденцию к снижению, как по отдельным категориям персонала, так и по всему предприятию в целом. Заключение: В заключении подтверждается эффективность действующих мер радиационной безопасности и определены приоритетные направления совершенствования системы радиационного контроля на предприятии.

Ключевые слова: дозы облучения, предприятия атомного судостроения и судоремонта, радиоактивные отходы, условия труда, радиационная безопасность, радиационный контроль.

Введение

Судостроительная промышленность обладает значительным научно-техническим и производственным потенциалом, который позволяет ей вносить существенный вклад в развитие технологий в смежных отраслях и обеспечивать национальную безопасность Российской Федерации в различных аспектах морской деятельности, включая оборону, транспорт, продовольственное снабжение, энергетику и технологические инновации^{1,2} [1]. В соответствии со Стра-

тегией развития судостроительной промышленности на период до 2035 года³ организации отрасли ежегодно увеличивают объемы производства. Целевым показателем является увеличение объемов производства к 2035 году в 2,2 раза по сравнению с 2019 годом.

В технологическом процессе предприятий атомного судостроения и судоремонта образуются радиоактивные отходы (РАО), что отличает их от других предприятий судостроительной отрасли [2–4]. Наблюдающийся в последние годы рост объема строительства и ремонта атомных морских объектов

¹Постановление Правительства Российской Федерации от 31.03.2017 № 374 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013 - 2030 годы» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 374 dated March 31, 2017, "On Approval of the State Program of the Russian Federation 'Development of Shipbuilding and Technology for the Development of Offshore Fields for 2013-2030' (In Russ.)]

²Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.10.2019 № 2553-р «Об утверждении Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года» [Order of the Government of the Russian Federation № 2553-r dated 28 October 2019 "On Approval of the Strategy for the Development of the Shipbuilding Industry for the Period up to 2035" (In Russ.)]

³Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 октября 2019 г. № 2553-р «Об утверждении Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года» [Order of the Government of the Russian Federation dated October 28, 2019, № 2553-r "On Approval of the Strategy for the Development of the Shipbuilding Industry for the Period up to 2035" (In Russ.)]

Арефьева Дарья Владимировна

Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины

Адрес для переписки: 196143, Россия, Санкт-Петербург, проспект Юрия Гагарина, д. 65; E-mail: lab1niipmm@yandex.ru

приводит к увеличению работ с РАО, что создает риск повышения доз облучения персонала при выполнении данных работ.

Согласно Указу Президента Российской Федерации от 13 октября 2018 г. № 585⁴, одной из задач ядерной и радиационной безопасности является защита персонала, населения и окружающей среды от радиационного воздействия и минимизация индивидуальных доз облучения при эксплуатации источников ионизирующего излучения. Для решения данной задачи необходимо постоянно совершенствовать меры по обеспечению радиационной безопасности персонала [5–7]. Однако для повышения их эффективности требуется изучение качественных и количественных характеристик производственных факторов, негативно влияющих на здоровье персонала.

С начала 2000-х годов активно проводились работы по утилизации атомных подводных лодок, кораблей с ядерной энергетической установкой, а также судов атомного технологического обслуживания на предприятиях атомного судостроения и судоремонта. Данные работы сопровождались научными исследованиями по гигиенической оценке условий труда [8–12]. На основе полученных материалов были разработаны мероприятия, направленные на сохранение здоровья и профессиональное долголетие указанных работников [13, 14]. Также в публикациях представлены результаты гигиенической оценки условий труда персонала предприятий атомного судостроения и судоремонта при обращении с РАО [15–17].

Научная новизна данной работы заключается в комплексной оценке радиационной обстановки на предприятиях атомного судостроения и судоремонта при обращении с РАО. Проведён детализированный анализ радиационных факторов на всех этапах работ (переработка жидких и твёрдых РАО, хранение, сжигание низкоактивных отходов) с учётом пространственного распределения мощности дозы гамма-излучения на разных высотах от пола.

Цель исследования – оценка радиационной обстановки на рабочих местах персонала предприятий атомного судостроения и судоремонта при обращении с РАО для выявления приоритетных направлений совершенствования системы радиационного контроля.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи, которые заключались в определении особенностей формирования: радиационной обстановки на рабочих местах персонала, индивидуальных эффективных доз облучения персонала.

Материалы и методы

Исследования выполнены на крупнейшем предприятии атомного судостроения и судоремонта, осуществляющим

полный цикл работ по обращению с РАО.

Объект исследования – условия труда персонала, выполняющего работы по обращению с РАО; предмет исследования – радиационная обстановка на рабочих местах.

Для анализа особенностей формирования радиационной обстановки на рабочих местах персонала использованы как результаты собственных исследований, так и данные производственного контроля, предоставленные отделом ядерной и радиационной безопасности предприятия.

Проанализированы результаты ежемесячного производственного контроля радиационной обстановки за период 2017 – 2022 гг. и данные нарядов-допусков на проведение радиационно опасных работ по обращению с РАО за 2020 – 2022 гг.

На рабочих местах персонала исследованы: мощность AMBIENTного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения, уровни загрязнения рабочих поверхностей альфа- и бета-излучающими радионуклидами. В точках, где были зарегистрированы повышенные уровни загрязнения поверхностей радиоактивными веществами, также проводили отбор проб снимаемого радиоактивного загрязнения.

Для оценки особенностей формирования радиационной обстановки при выполнении работ по обращению с РАО измерения МАЭД проведены на следующих высотах от пола: 30 см, 80 см, 120 см и 160 см с использованием спектрометра МКС-АТ6102А (НПУП «АТОМТЕХ», Республика Беларусь) в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации на прибор и Методическими указаниями МУ 2.6.5.008-2016 «Контроль радиационной обстановки. Общие требования»⁵.

Оценка уровней загрязнения рабочих поверхностей альфа- и бета-излучающими радионуклидами проведена на основе измерений плотности потока альфа- и бета-частиц с использованием дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации на прибор, МУ 2.6.5.032-2017 «Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей»⁶ и Методикой измерений удельной активности гамма- и бета-излучающих радионуклидов в жидких, сыпучих и твердых пробах с применением спектрометра-радиометра МКГБ-01 «РАДЭК»⁷.

Расширенную относительную неопределенность ($k=2$) измерений принимали равной относительной погрешности средства измерения в предположении нормального распределения показаний.

Отбор проб снимаемого радиоактивного загрязнения поверхностей и их последующее измерение выполняли согласно методике измерений снимаемой поверхностной активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов с ис-

⁴Указ Президента Российской Федерации от 13 октября 2018 г. № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» [Decree of the President of the Russian Federation dated October 13, 2018, № 585 "On Approval of the Fundamentals of State Policy in the Field of Nuclear and Radiation Safety of the Russian Federation for the Period up to 2025 and Beyond". (In Russ.)]

⁵Методические указания МУ 2.6.5.008-2016 «Контроль радиационной обстановки. Общие требования». М.: ФМБА России, 2016. 35 с. [Methodological Guidelines MU 2.6.5.008-2016 "Radiation Monitoring. General Requirements", Moscow, FMBA of Russia, 2016, 35 p. (In Russ.)]

⁶Методические указания МУ 2.6.5.032-2017 «Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей». М.: ФМБА России, 2017. 62 с. [Methodological Guidelines MU 2.6.5.032-2017 "Monitoring of Radioactive Surface Contamination". Moscow: FMBA of Russia; 2017. 62 p. (In Russ.)]

⁷Методика измерений удельной активности гамма- и бета-излучающих радионуклидов в жидких, сыпучих и твердых пробах с применением спектрометра-радиометра МКГБ-01 «РАДЭК» (свидетельство об аттестации методики измерений № 678/210-(01.00250)-2015) [Method for measuring the specific activity of gamma- and beta-emitting radionuclides in liquid, bulk, and solid samples using the MKGB-01 RADEC spectrometer-radiometer (Certificate of Attestation of the Measurement Method № 678/210-(01.00250)-2015). (In Russ.)]

пользованием носимого радиометра, устройства для отбора мазков УОМ-01Т и приспособления для измерения активности радионуклидов в фиксированной геометрии УИМ-01Т (НИИ ПММ, Россия) в соответствии с Методикой измерений снимаемой поверхностной активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов (свидетельство об аттестации методики измерений № 451/210-(01.00250-2008)-2013)⁸, расчет неопределённости измерений проводился по методике выполнения измерений.

Индивидуальные эффективные дозы облучения персонала предприятия проанализированы по материалам, содержащимся в форме № 1-ДОЗ «Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях нормальной эксплуатации организациями техногенных источников ионизирующих излучений» за 2017-2022 гг.

Результаты и обсуждение

Для выполнения работ с РАО на предприятии эксплуатируется цех, включающий в себя следующую основную инфраструктуру:

- комплекс по переработке жидких и твердых радиоактивных отходов;
- спецпрачечная;
- участок сжигания низкоактивных твердых радиоактивных отходов (ТРО);
- участок хранения жидких радиоактивных отходов (ЖРО);
- участок хранения ТРО.

Согласно результатам специальной оценки условий труда (СОУТ) за 2023 год, основным вредным производственным фактором в рассматриваемом цехе является ионизирующее излучение (класс условий труда 3.3 на 91 % рабочих мест и класс 3.4 - на одном рабочем месте).

По уровню освещённости допустимый класс условий труда зафиксирован на 23,5 % рабочих мест, а по тяжести трудового процесса – на 34,4 % рабочих мест. На 11,7 % рабочих мест установлен химический фактор (допустимые условия труда (класс 2) и вредные условия труда (класс 3.1)).

Таким образом, на персонал судостроительного предприятия при обращении с РАО воздействует комплекс вредных производственных факторов. В рамках данной работы для детального анализа состояния производственной среды на различных этапах выполнения работ с РАО проведено исследование радиационного фактора, воздействующего на персонал.

Основной объем работ по обращению с РАО проводится в комплексе по переработке ЖРО и ТРО. Переработка ТРО осуществляется в основном вручную персоналом цеха. Участки помещений, где производятся операции с возможным поступлением радиоактивных веществ в воздух рабочей зоны (прессование, резка, дезактивация), удалены от других рабочих мест, а сами операции выполняются при работе местных вытяжных установок с применением индивидуальных средств индивидуальной защиты органов дыхания.

Работы по переработке ЖРО проводятся в большинстве случаев в автоматическом режиме и не требуют постоянного нахождения персонала на технологических участках, в то же время при выполнении работ по обслуживанию технологических систем возможно формирование неблагоприятной радиационной обстановки.

Особенностью условий труда при обращении с РАО является возможность значительных изменений уровней ионизирующих излучений в зависимости от вида выполняемых работ в течение одной рабочей смены.

Результаты ежемесячного производственного контроля радиационной обстановки за период 2017–2022 гг. при выполнении работ по обращению с РАО представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения по данным производственного контроля

[Table 1. Results of measuring of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation according to production control data]

Наименование участка обращения с РАО [Name of the radioactive waste management site]	Значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения*, мкЗв/ч [The values of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation*, mSv/h]					
	в 2017 году [in 2017 year]	в 2018 году [in 2018 year]	в 2019 году [in 2019 year]	в 2020 году [in 2020 year]	в 2021 году [in 2021 year]	в 2022 году [in 2022 year]
Хранение ЖРО [Storage of liquid radioactive waste]	3,61 (3,33;3,90)	3,43 (3,21;3,66)	13,66 (10,21; 17,11)	10,48 (7,56; 13,41)	5,38 (5,00; 5,78)	3,3 (2,79; 3,81)
Переработка ТРО [Processing of solid radioactive waste]	38,66 (34,59; 42,73)	81,05 (68,22; 93,88)	241,62 (191,08; 292,16)	234,4 (165,51; 303,29)	677,83 (461,33; 894,34)	503,87 (424,67; 583,08)
Переработка ЖРО [Processing of liquid radioactive waste]	56,94 (47,15; 66,74)	66,04 (45,74; 86,34)	271,28 (197,47; 345,09)	227,78 (176,19; 279,38)	232,08 (202,27; 261,90)	359 (282,76; 435,24)
Сжигание низкоактивных ТРО [Burning of solid radioactive waste]	6,5 (5,66; 7,34)	3,6 (3,29; 3,92)	7,73 (6,67; 8,80)	9,53 (8,71; 10,60)	13,69 (10,91; 16,48)	12,37 (9,92; 14,83)
Хранение ТРО [Storage of solid radioactive waste]	123 (101,64; 144,36)	62 (57,81; 66,19)	56,11 (53,39; 58,82)	114,92 (108,62; 121,21)	288,92 (185,83; 392,00)	84,25 (78,99; 89,51)

* В таблице указаны средние значения, в скобках указаны нижняя и верхняя граница 95 % доверительного интервала [The table shows the average values, with the lower and upper bounds of the 95 % confidence interval in parentheses].

⁸ Методика измерений снимаемой поверхностной активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов (номер в Федеральном реестре методик измерений: ФР.1.40.2015.19924, свидетельство об аттестации методики измерений № 451/210-(01.00250-2008)-2013) [Measurement method for the surface activity of alpha- and beta-emitting radionuclides (Federal Register number: FR.1.40.2015.19924, Certificate of Approval of the Measurement Method № 451/210-(01.00250-2008)-2013). (In Russ.)]

Таблица 2. Результаты измерения снимаемого загрязнения поверхностей бета-излучающими радионуклидами по данным производственного контроля

[Table 2. Measurement results of the removable surface contamination by beta-emitting radionuclides according to production control data]

Наименование участка обращения с РАО [Name of the radioactive waste management site]	Значения снимаемого загрязнения поверхностей бета-излучающими радионуклидами*, (част./((см ² ·мин)) [Values of the surface contamination by beta-emitting radionuclides* to be removed, (parts/(cm ² ·min))]					
	в 2017 году [in 2017 year]	в 2018 году [in 2018 year]	в 2019 году [in 2019 year]	в 2020 году [in 2020 year]	в 2021 году [in 2021 year]	в 2022 году [in 2022 year]
Хранение ЖРО [Storage of liquid radioactive waste]	66,67 (51,03; 82,31)	49,58 (46,64; 52,52)	1109,58 (626,03; 1593,14)	10261,3 (3347,78; 17174,74)	33,75 (33,11; 35,39)	31,25 (28,94; 33,56)
Переработка ТРО [Processing of solid radioactive waste]	96,67 (83,56; 109,78)	247,58 (208,82; 340,34)	256,67 (199,32; 314,01)	232,5 (185,35; 279,65)	2087,92 (1185,50; 2990,34)	1336,25 (777,14; 1895,36)
Переработка ЖРО [Processing of liquid radioactive waste]	102,08 (87,01; 117,16)	172,08 (136,31; 207,86)	116,67 (98,06; 135,28)	197,5 (145,70; 249,30)	800,83 (322,48; 1279,19)	395,62 (179,91; 611,34)
Сжигание низкоактивных ТРО [Burning of solid radioactive waste]	Менее 10 [Less than 10]	Менее 10 [Less than 10]	33,33 (5,38; 61,28)	4,17 (0,67; 7,66)	5,83 (3,21; 8,46)	10 (6,58; 13,42)
Хранение ТРО [Storage of solid radioactive waste]	165 (101,71; 229,96)	35 (16,29; 53,71)	48,33 (29,96; 66,70)	15,83 (11,78; 19,89)	16,67 (8,78; 24,55)	Менее 10 [Less than 10]

* В таблице указаны средние значения, в скобках указаны нижняя и верхняя граница 95 % доверительного интервала [The table shows the average values, with the lower and upper bounds of the 95 % confidence interval in parentheses].

Из данных таблицы 1 следует, что наибольшие уровни МАЭД зарегистрированы в помещениях переработки ТРО и ЖРО, а также на объекте, предназначенном для хранения ТРО. Это обусловлено выполнением работ с низко- и средне-активными РАО, а также хранением на участках контейнеров с отходами, бочек со шламом, фильтрами доочистки и др.

Из данных таблицы 2 следует, что наибольшие значения снимаемого поверхностного загрязнения зарегистрированы в помещениях объекта, предназначенного для хранения ЖРО (в 2020 году на данном участке выполнялись работы по обслуживанию (чистке и дезактивации) емкостей для сбора ЖРО, выгрузке осадка из них и др.). В 2021 году

отмечено повышение уровней снимаемого поверхностного загрязнения в помещениях, предназначенных для переработки ТРО, что обусловлено проведением радиационно опасных работ в данный период времени по дезактивации поверхности пола, приемом и переработкой ТРО. По результатам производственного контроля объемная активность радионуклидов в воздухе рабочих зон была меньше минимально измеряемой активности (менее 37 Бк/л).

Для оценки особенностей формирования радиационной обстановки на рабочих участках при различных этапах обращения с РАО были проведены измерения МАЭД на различных высотах от уровня пола (табл. 3–5).

Таблица 3. Результаты измерений мощности амбиентного эквивалента дозы на участках, предназначенных для переработки жидких радиоактивных отходов

[Table 3. The results of measurements of the ambient dose equivalent rate at sites intended for the processing of liquid radioactive waste]

Наименование участка измерения [Name of the measuring area]	Мощность амбиентного эквивалента дозы на высоте от уровня пола*, мкЗв/ч [Ambient dose equivalent rate at altitude from the floor level*, mSv/h]			
	30 см [30 cm]	80 см [80 cm]	120 см [120 cm]	160 см [160 cm]
Участок выпаривания ЖРО (нижний уровень) [Liquid radioactive waste evaporation site (lower level)]	13,14 (1,69; 24,57)	5,10 (2,57; 7,62)	3,53 (2,17; 4,88)	2,89 (2,02; 3,74)
Участок выпаривания ЖРО (верхний уровень) [Liquid radioactive waste evaporation site (upper level)]	5,33 (0,33; 10,32)	3,60 (1,08; 6,12)	3,15 (0,42; 5,88)	3,24 (0,55; 7,03)
Участок обратного осмоса [Reverse Osmosis site]	1,74 (1,27; 2,22)	2,20 (2,80; 1,60)	2,39 (1,77; 3,01)	2,45 (1,75; 3,16)

Наименование участка измерения [Name of the measuring area]	Мощность амбиентного эквивалента дозы на высоте от уровня пола*, мкЗв/ч [Ambient dose equivalent rate at altitude from the floor level*, mSv/h]			
	30 см [30 cm]	80 см [80 cm]	120 см [120 cm]	160 см [160 cm]
Участок сорбционной очистки [Sorption purification site]	3,85 (1,86; 5,85)	3,22 (1,89; 4,55)	2,59 (1,76; 3,42)	2,28 (1,58; 2,99)
Участок очистки ЖРО с линии спецпрачечной [A site for cleaning liquid radioactive waste from a special treatment line]	6,84 (1,08; 12,91)	9,18 (1,16; 19,53)	4,27 (0,53; 8,01)	3,03 (0,63; 5,43)
Участок расположения цистерн с ЖРО [Location of tanks with liquid radioactive waste]	0,19 (0,14; 0,24)	0,16 (0,13; 0,19)	0,15 (0,13; 0,17)	0,15 (0,13; 0,18)

* В таблице указаны средние значения, в скобках указаны нижняя и верхняя граница 95 % доверительного интервала [The table shows the average values, with the lower and upper bounds of the 95 % confidence interval in parentheses].

Таблица 4. Результаты измерений мощности амбиентного эквивалента дозы на участках, предназначенных для переработки твердых радиоактивных отходов

[Table 4. Results of measurements of the ambient dose equivalent rate at sites intended for solid radioactive waste processing]

Наименование участка измерения [Name of the measuring area]	Мощность амбиентного эквивалента дозы на высоте от уровня пола*, мкЗв/ч [Ambient dose equivalent rate at altitude from the floor level*, mSv/h]			
	30 см [30 cm]	80 см [80 cm]	120 см [120 cm]	160 см [160 cm]
Участок приема и сдачи контейнеров с ТРО [The site of reception and delivery of containers with solid radioactive waste]	1,85 (0,73; 2,96)	1,95 (1,03; 2,86)	1,37 (1,00; 1,73)	1,34 (1,09; 1,58)
Участок у стола для сортировки ТРО [The area at the table for sorting solid radioactive waste]	2,83 (0,89; 4,79)	2,63 (0,75; 4,51)	2,09 (0,63; 3,55)	1,85 (0,49; 3,21)
Участок у поддона для сбора и сортировки ТРО [The area near the pallet for collecting and sorting solid radioactive waste]	8,90 (1,53; 16,26)	3,87 (2,19; 5,54)	2,87 (1,90; 3,84)	2,27 (1,65; 2,89)
Помещение для временного хранения ТРО [Temporary storage of solid radioactive waste]	3,80 (2,89; 4,70)	6,15 (1,79; 10,50)	4,15 (3,64; 4,66)	2,95 (1,53; 4,37)

* В таблице указаны средние значения, в скобках указаны нижняя и верхняя граница 95 % доверительного интервала [The table shows the average values, with the lower and upper bounds of the 95 % confidence interval in parentheses].

Таблица 5. Результаты измерений мощности амбиентного эквивалента дозы на участках обращения с радиоактивными отходами

[Table 5. Results of measurements of the ambient dose equivalent rate at radioactive waste management sites]

Наименование участка измерения [Name of the measuring area]	Мощность амбиентного эквивалента дозы на высоте от уровня пола*, мкЗв/ч [Ambient dose equivalent power at altitude from the floor level*, mSv/h]			
	30 см [30 cm]	80 см [80 cm]	120 см [120 cm]	160 см [160 cm]
Спецпрачечная [Specialized laundry]	0,06 (0,05; 0,07)	0,06 (0,05; 0,07)	0,06 (0,05; 0,07)	0,07 (0,06; 0,08)
Участок хранения ЖРО [Liquid radioactive waste storage area]	0,31 (0,09; 0,53)	0,31 (0,11; 0,51)	0,29 (0,13; 0,45)	0,19 (0,07; 0,31)
Участок хранения ТРО [Solid radioactive waste storage area]	8,78 (5,03; 12,53)	9,17 (4,71; 13,62)	5,61 (3,11; 8,11)	5,67 (2,94; 8,39)

* В таблице указаны средние значения, в скобках указаны нижняя и верхняя граница 95 % доверительного интервала [The table shows the average values, with the lower and upper bounds of the 95 % confidence interval in parentheses].

Как следует из данных, представленных в таблицах 3–5, формирование радиационных полей на участках выполнения

работ имеет достаточно выраженные особенности. Так, наибольшие значения МАЭД на участках переработки ТРО

и ЖРО установлены на расстоянии 30 см и 80 см от пола, следовательно, большому облучению подвергается нижняя часть тела работников. В то же время необходимо отметить, что работы по сортировке и фрагментации ТРО являются преимущественно ручными, соответственно, кисти рук могут подвергаться большому облучению, чем другие части тела.

Для работников спецпрачечной в основном характерно однородное облучение всего тела, за исключением случаев проведения работ по сортировке спецбелья со значительным радиоактивным загрязнением (что связано с выполнением данной операции вручную мастером по ремонту и стирке белья).

При выполнении работ на участках хранения ЖРО и ТРО наибольший вклад в дозу облучения вносит излучение от контейнеров (цистерн) с отходами, которые формируют относительно равномерное облучение всего тела работника.

Уровни снимаемого загрязнения радиоактивными веществами рабочих поверхностей не превышали нормативных значений для помещений периодического пребывания персонала, приведённых в НРБ-99/2009⁹. По результатам измерений активности радионуклидов в мазках, снимаемых с рабочих поверхностей, определено следующее: во всех отобранных мазках (33 шт.) обнаружен ¹³⁷Cs (от 0,8 до 240 Бк), в девяти мазках – ⁶⁰Co (от 0,7 до 10 Бк), в одном – ¹⁵²Eu (18,9 Бк), в двух – ⁵⁴Mn (от 3,6 до 4,1 Бк).

Анализ нарядов-допусков на проведение радиационно опасных работ по обращению с РАО за 2020 - 2022 гг. показал, что в этих работах в основном участвуют работники следующих специальностей: переработчики РАО – 57,88 % от общего числа персонала, дозиметристы – 21,33 %, маляры – 4,42 % и слесари-ремонтники – 5,63 %.

Выполнение радиационно опасных работ характеризуется как высокими значениями МАЭД на рабочих местах

(например, 3,5 мЗв/ч при переработке ТРО и цементирование сорбента), так и снимаемого радиоактивного загрязнения поверхностей бета-излучающими радионуклидами (до 10⁵ част./см²·мин.) при выгрузке осадка из емкостей временного хранения ЖРО в специальные контейнеры-сборники и выпаривании емкостей ЖРО). Объемная активность радиоактивных веществ в воздухе рабочей зоны не превышала минимально измеряемой активности (37 Бк/л).

Максимальные значения индивидуальной дозы зарегистрированы у переработчиков РАО при выполнении работ по переработке ТРО: за 1 ч 45 мин – 1,16 мЗв (контрольный уровень составляет 1,5 мЗв в месяц). Таким образом, при выполнении некоторых видов работ за одну рабочую смену возможно облучение персонала в дозе, равной месячному контрольному уровню. На предприятии значение контрольного уровня дозы облучения за месяц установлено для всего персонала, занятого в выполнении работ, и не учитывает специальность персонала, объем и характер выполняемых работ.

Результаты анализа индивидуальных доз облучения персонала по данным статистических отчетных форм № 1-ДОЗ «Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях нормальной эксплуатации организациями техногенных источников ионизирующих излучений» за период 2017-2022 гг. представлены в таблице 6.

На предприятии текущий индивидуальный дозиметрический контроль проводится с использованием термoluminescentных дозиметров, в случае проведения радиационно опасных работ дополнительно используются прямопоказывающие дозиметры. Анализ индивидуальных ожидаемых эффективных доз внутреннего облучения персонала группы А проводится с применением сцинтилляционного гамма-спектрометра «Прогресс-СИЧ».

Таблица 6. Значения индивидуальных доз облучения персонала за период 2017-2022 гг.

[Table 6. Values of individual personnel radiation doses for the period 2017-2022]

Специальность [Specialization]	Средние значения индивидуальной эффективной дозы внешнего/внутреннего облучения*, мЗв [Average values of the individual effective dose of external/internal irradiation*, mSv]					
	2017 год [year 2017]	2018 год [year 2018]	2019 год [year 2019]	2020 год [year 2020]	2021 год [year 2021]	2022 год [year 2022]
Переработчик РАО [The RW processor]	1,83 ± 0,61 / 0,06 ± 0,05	2,01 ± 0,45 / 0,08 ± 0,05	2,13 ± 1,01 / 0,03 ± 0,04	1,47 ± 0,37 / 0	1,32 ± 0,43 / 0,03 ± 0,03	1,14 ± 0,26 / 0,03 ± 0,03
Дозиметрист [Dosimetrist]	1,58 ± 1,01 / 0,03 ± 0,02	1,12 ± 0,81 / 0,02 ± 0,02	1,16 ± 0,55 / 0,02 ± 0,02	0,88 ± 0,34 / 0	0,90 ± 0,41 / 0,01 ± 0,02	0,89 ± 0,35 / 0,01 ± 0,02
Слесарь-ремонтник [Repairman]	1,19 ± 0,47 / 0,03 ± 0,05	1,27 ± 0,60 / 0,02 ± 0,02	1,32 ± 0,62 / 0,01 ± 0,01	0,79 ± 0,52 / 0	0,99 ± 0,61 / 0,01 ± 0,01	0,89 ± 0,45 / 0,01 ± 0,02
Маляр [Painter]	0,67 ± 0,59 / 0,01 ± 0,01	0,37 ± 0,31 / 0	0,43 ± 0,38 / 0	0,47 ± 0,54 / 0	0,48 ± 0,43 / 0	0,39 ± 0,28 / 0
Персонал группы А [Group A staff]	1,26 ± 1,25 / 0,01 ± 0,02	1,07 ± 1,06 / 0,01 ± 0,02	1,08 ± 1,24 / 0,01 ± 0,02	0,85 ± 0,96 / 0,01	0,89 ± 1,05 / 0,01 ± 0,01	0,81 ± 0,99 / 0,01 ± 0,01

* В таблице приведены средние значения с указанием их стандартных отклонений [The table shows the average values with their standard deviations].

Как следует из данных таблицы 6, средние значения индивидуальной дозы облучения персонала значительно ниже

установленного НРБ-99/2009 предела. В то же время установлено, что во время выполнения определённых радиаци-

⁹ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. № 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09» [Resolution № 47 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated July 7, 2009 "About the approval of SanPiN 2.6.1.2523-09" (In Russ.)]

онно опасных работ работники могут получить дозу облучения до 1,16 мЗв за одну смену, что практически равно среднегодовой дозе облучения на предприятии.

Также отмечено поступление радионуклидов в организм работников. Для переработчиков РАО значения ожидаемой эффективной дозы облучения были примерно в 3 раза выше по сравнению с остальным персоналом группы А. Основным путем поступления радионуклидов в организм работников в производственных условиях является ингаляционный. Установленные высокие уровни загрязнения рабочих поверхностей могут приводить к вторичной дефляции вследствие сдувки частиц радиоактивных веществ при работе вентиляции либо вследствие возникающих потоков воздуха при перемещении персонала, и, как следствие, к повышению активности радионуклидов в воздухе. Вместе с тем, по результатам производственного контроля радиационной обстановки загрязнение радиоактивными веществами воздуха рабочей зоны не зарегистрировано, что может говорить о необходимости повышения эффективности контроля поступления радиоактивных веществ в воздух рабочей зоны.

Таким образом, дозы облучения персонала на рабочих местах при обращении с РАО формируются преимущественно за счет гамма-излучения. Сравнение средних значений МАЭД показывает, что персонал, работающий на участках переработки ТРО и ЖРО, а также хранения ТРО, подвергается большему радиационному воздействию по сравнению с работниками спецпрачечной или участка временного хранения ЖРО. Полученные значения индивидуальных доз значительно ниже установленных пределов, что свидетельствует об эффективности действующих мер радиационной безопасности. Однако важно отметить, что в отдельных случаях за одну рабочую смену работник может получить дозу облучения, практически равную среднегодовой, что требует особого внимания к планированию и учету индивидуальных доз при выполнении радиационно опасных работ.

В тоже время, несмотря на отсутствие радиоактивных веществ в воздухе рабочей зоны по результатам производственного контроля, при выполнении ряда работ отмечаются уровни снимаемого поверхностного загрязнения выше установленных нормативов. Это свидетельствует о вероятности поступления радионуклидов в организм работников и подчеркивает необходимость разработки дополнительных мер по оперативному и более детальному контролю состояния воздушной среды.

Таким образом, приоритетным направлением совершенствования радиационного контроля на предприятии является:

- внедрение контрольных уровней дозы облучения за период выполнения одной однотипной радиационно опасной работы для каждой специальности персонала в целях снижения индивидуальных доз облучения персонала. В случае обнаружения превышения данного контрольного уровня необходимо после окончания проведения радиационно опасных работ провести анализ причин и определить меры радиационной безопасности для снижения полученной дозы облучения в дальнейшем,
- использование методов оперативного контроля объемной активности радионуклидов в воздухе на основе прямых измерений, например, с использованием переносных приборов радиационного контроля плотности потока альфа- и бета-частиц с экспонированного фильтра

АФА-РСП20. Отбор проб воздуха при проведении радиационного контроля рекомендуется производить в непосредственной близости от зоны дыхания персонала или использовать индивидуальные аэрозольные дозиметры.

Заключение

При выполнении работ по обращению с РАО ведущим вредным и (или) опасным производственным фактором является ионизирующее излучение, представленное внешним гамма-излучением и загрязнением поверхностей бета-излучающими радионуклидами (фиксированным и снимаемым).

Отмечается незначительное ухудшение радиационной обстановки на объектах по переработке ЖРО и ТРО, при этом средние значения индивидуальных доз облучения имеют тенденцию к снижению как по отдельным категориям персонала, так и по всему предприятию в целом, что говорит об эффективности обеспечения радиационной безопасности.

Выявлено неравномерное распределение дозовой нагрузки на разные части тела у персонала при выполнении различных этапов работ по обращению с РАО.

На основании полученных данных разработаны рекомендации по совершенствованию мероприятий, направленных на снижение доз облучения и оптимизацию радиационной защиты персонала предприятий атомного судостроения и судоремонта.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Арефьева Дарья Владимировна – координация работы участников исследования, организация экспедиционных работ, сбор и систематизация данных, поиск литературных источников, обработка полученных результатов, написание и редактирование текста статьи.

Габский Юрий Валентинович – научное редактирование текста, проверка критически важного интеллектуального содержания.

Балтрукова Татьяна Борисовна – научное руководство исследованием, утверждение окончательного варианта рукописи.

Петушок Александра Владимировна – обработка и систематизация первичных материалов исследования, поиск литературных данных.

Благодарности

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Исследование выполнено в рамках Государственного задания от 29.12.2023 № 388-00089-24-00.

Литература

1. Утяшова О.В., Забелин А.А. Роль судостроения в обеспечении ускоренного развития Дальнего Востока в современных условиях // Московский экономический журнал. 2023. № 3. С. 364-372.

2. Лямин П.Л., Петухов В.В. Проблемы утилизации кораблей и судов с ядерными энергетическими установками // Судостроение. 2019. № 3(844). С. 50-54.
3. Сергеев А.И. Проблематика утилизации судов атомного технологического обслуживания. Ломоносовские чтения. Актуальные вопросы фундаментальных и прикладных исследований: сборник статей V Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 23 декабря 2020 года. Петрозаводск, 2020. С. 117-122.
4. Прокофьева Е.А. Русская Арктика: радиационная безопасность в перспективном регионе. Научные теории и разработки в условиях глобальных перемен: пределы и возможности: Материалы XI Международной научно-практической конференции, Рязань, 28 июля 2023 года. Рязань, 2023. С. 265-268.
5. Лямин П.Л., Петухов В.В., Таиров Т.Н. Утилизация морских объектов использования атомной энергии и проблемы учета и контроля отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов // Судостроение. 2012. № 6(805). С. 42-47.
6. Волков В.Г., Герасов А.В., Гончаров Л.А. и др. Оптимизация системы радиационной защиты персонала при проведении работ по выводу из эксплуатации исследовательских реакторов МР и РФТ в НИЦ «Курчатовский институт» // АНРИ. 2013. № 1(72). С. 48-52.
7. Симаков А.В., Абрамов Ю.В., Проскурякова Н.Л. Радиационно-гигиенические аспекты управления безопасностью персонала. // Гигиена и санитария. 2017. 96(9). С. 878-882.
8. Иванченко А.В., Натха С.В., Шаяхметова А.А., Арефьева Д.В. Исследование факторов, влияющих на формирование радиационной обстановки при утилизации атомных объектов морской техники // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 4. С. 19-22.
9. Хазагеров С.М., Шаяхметова А.А., Арефьева Д.В., Иванова Т.А. Обоснование порядка контроля индивидуальных эквивалентных доз в хрусталике глаза от фотонного излучения в производственных условиях на предприятиях атомного судостроения и судоремонта // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-3. С. 48.
10. Степанов В.В., Крупкин А.Б., Иванченко А.В. и др. Гигиенические аспекты условий труда персонала предприятий, выполняющих работы по утилизации атомных подводных лодок и судов атомного технологического обслуживания // Medline.ru. Российский биомедицинский журнал. 2019. Т. 20. С. 307-321.
11. Крупкин А.Б., Степанов В.В., Саенко С.А. и др. Условия труда персонала при постройке, ремонте и утилизации атомных подводных лодок на предприятиях атомного судостроения и судоремонта // Medline.ru. Российский биомедицинский журнал. 2013. Т. 14. С. 465-479.
12. Походзей Л.В., Матвеев К.М., Крупкин А.Б. и др. Условия труда и состояние здоровья персонала при утилизации атомных подводных лодок и судов атомного технологического обслуживания // Медицина труда и промышленная экология. 2015. № 9. С. 119-120.
13. Симаков А.В., Арефьева Д.В., Абрамов Ю.В. и др. Совершенствование нормативного обеспечения радиационной безопасности персонала при утилизации кораблей с ядерными энергетическими установками и судов атомного технологического обслуживания // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66, № 4. С. 37-41.
14. Симаков А.В., Метляева Н.А., Абрамов Ю.В. и др. Совершенствование санитарно-гигиенического и медицинского обеспечения персонала радиационно опасных объектов // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 4. С. 37-41.
15. Арефьева Д.В., Балтрукова Т.Б., Степанов В.В. и др. Гигиеническая оценка условий труда персонала предприятий атомного судостроения и судоремонта при обращении с радиоактивными отходами // Медицина труда и промышленная экология. 2025. Т. 65, № 3. С. 165-173.
16. Арефьева Д.В., Степанов В.В., Кожухова Н.А., Петушок А.В. Априорная оценка профессиональных рисков для здоровья персонала, выполняющего работы по обращению с радиоактивными отходами. Гигиена труда: вчера, сегодня, завтра: сборник трудов очно-заочной Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию курса «Гигиена труда» кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета имени И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, 22 мая 2025 года. СПб., 2025. С. 22-26.
17. Верведа А.Б., Арефьева Д.В., Авдиенко Г.Ю. и др. Оценка апостериорного профессионального риска для здоровья отдельных категорий персонала, выполняющего работы по обращению с радиоактивными отходами. Гигиена труда: вчера, сегодня, завтра: сборник трудов очно-заочной Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию курса «Гигиена труда» кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета имени И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, 22 мая 2025 года. СПб., 2025. С. 46-50.

Поступила: 29.08.2025

Арефьева Дарья Владимировна – исполняющая обязанности заведующего лабораторией № 1 Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства.
Адрес для переписки: 196143, Россия, Санкт-Петербург, проспект Юрия Гагарина, д. 65; E-mail: lab1niipmm@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3879-8594, РИНЦ Author ID: 914975

Грабский Юрий Валентинович – врио директора Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-8563-3290, РИНЦ Author ID: 534106

Балтрукова Татьяна Борисовна – доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории № 2 Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-8726-7044, РИНЦ Author ID: 268265

Петушок Александра Владимировна – младший научный сотрудник лаборатории № 1 Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-1017-1159, РИНЦ Author ID: 1060335

Для цитирования: Арефьева Д.В., Грабский Ю.В., Балтрукова Т.Б., Петушок А.В. Радиационная обстановка на рабочих местах персонала при обращении с радиоактивными отходами на предприятиях атомного судостроения и судоремонта // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 53–62. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-53-62

Radiation situation at workplaces of personnel during radioactive waste management at nuclear shipbuilding and ship repair enterprises

Darya V. Arefieva, Yuriy V. Grabsky, Tatyana B. Baltrukova, Aleksandra V. Petushok

Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine, Federal Medical and Biological Agency, Saint Petersburg, Russia

The relevance of the study is driven by the active development of the shipbuilding industry in Russia, including enterprises of atomic shipbuilding and ship repair, where radioactive waste is generated. The increase in work volumes with radioactive waste raises the risk of increased radiation doses to personnel, necessitating a comprehensive assessment of the radiation environment and improvement of the radiation control system. The aim of this work is to assess the radiation environment at personnel workplaces during radioactive waste handling and to identify priority directions for improving the radiation control system. Materials and Methods: The assessment of the radiation environment was performed based on the enterprise's production control materials and field study data. Parameter measurements were conducted using certified measurement methodologies. All measuring instruments underwent timely metrological verification. Results and Discussion: Results showed that the main radiation factors affecting personnel working conditions are external gamma radiation and radioactive contamination of work surfaces by beta-emitting radionuclides (both fixed and removable). An uneven distribution of dose load on the body was identified during different stages of radioactive waste handling. At the workplaces involved in processing liquid and solid radioactive waste, gamma radiation levels exceed those at other workplaces. However, the average individual radiation doses of personnel do not exceed dose limits and tend to decrease both within specific personnel categories and across the enterprise as a whole. Conclusion: The conclusion confirms the effectiveness of current radiation safety measures and identifies priority directions for improving the radiation control system at the enterprise.

Key words: radiation doses, nuclear shipbuilding and ship repair enterprises, radioactive waste, working conditions, radiation safety, radiation control.

Authors' personal contribution

Arefieva Daria Vladimirovna – coordination of the research participants, organization of expedition work, collection and systematization of data, search for literary sources, processing of the obtained results, writing and editing the text of the article.

Grabsky Yuriy Valentinovich – scientific editing of the text, verification of critically important intellectual content.

Baltrukova Tatyana Borisovna – scientific management of the research, approval of the final version of the manuscript.

Petushok Aleksandra Vladimirovna – processing and systematization of the primary research materials, search for literary data.

Acknowledgments

The authors are grateful to anonymous reviewers for their work.

Conflict of interests

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest in connection with the publication of this article.

Sources of funding

The study was carried out within the framework of the State Task No. 388-00089-24-00 dated 12/29/2023.

References

1. Utyashova OV, Zabelin AA. The role of shipbuilding in ensuring the accelerated development of the Far East in modern conditions. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2023;3:364-372. (In Russian).
2. Lyamin PL, Petukhov VV. Problems of recycling ships and vessels with nuclear power plants. *Sudostroenie = Shipbuilding*. 2019;3(844): 50-54. (In Russian).
3. Sergeev AI. Problems of recycling of nuclear technological service vessels. Lomonosov readings. Actual issues of fundamental and applied research: collection of articles of the V International Scientific and Practical Conference, Petrozavodsk, December 23; 2020. P. 117-122. (In Russian).
4. Prokofieva EA. The Russian Arctic: radiation safety in a promising region. Scientific theories and developments in the context of global change: limits and opportunities: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference, Ryazan, July 28; 2023. P. 265-268. (In Russian).
5. Lyamin PL, Petukhov VV, Tairov TN. Utilization of marine facilities for the use of atomic energy and problems of accounting and control of spent nuclear fuel and radioactive waste. *Sudostroenie = Shipbuilding*. 2012;6(805): 42-47. (In Russian).
6. Volkov VG, Gerasov AV, Goncharov LA, Drozdov AA, Zverkov YA, Ivanov OP, et al. Optimization of personnel radiation protection system during decommissioning of MR and RFT

Darya V. Arefieva

Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine

Address for correspondence: 65, Yuri Gagarin Avenue, Saint Petersburg, 196143, Russia; E-mail: lab1niipmm@yandex.ru

- research reactors at the Kurchatov Institute Research Center. *ANRI= ANRI*. 2013;1(72): 48-52. (In Russian).
7. Simakov AV, Abramov YuV, Proskuryakova NL. Radiation and hygienic aspects of personnel safety management. *Gigiyena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2017;96(9): 878-882. (In Russian).
 8. Ivanchenko AV, Natkha SV, Shayakhmetova AA, Arefyeva DV. Investigation of factors influencing the formation of the radiation environment during the disposal of nuclear facilities of marine equipment. *Radiatsionnaya inzheneriya = Radiation engineering*. 2013;6(4): 19-22. (In Russian).
 9. Khazagerov SM, Shayakhmetova AA, Arefyeva DV, Ivanova TA. Substantiation of the procedure for monitoring individual equivalent doses in the eye crystal from photon radiation in industrial conditions at nuclear shipbuilding and ship repair enterprises. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2015;2-3: 48. (In Russian).
 10. Stepanov VV, Krupkin AB, Ivanchenko AV, Kopin SV, Pisanko VL, Trofimchuk SN, et al. Hygienic aspects of working conditions of personnel of enterprises performing work on the disposal of nuclear submarines and nuclear technological service vessels. *Medline.ru. Rossiyskiy biomeditsinskiy zhurnal = Russian Biomedical Journal*. 2019;20: 307-321. (In Russian).
 11. Krupkin AB, Stepanov VV, Saenko SA, Kovygin GF, Dokhov MA, Matveev KM, et al. Working conditions of personnel during the construction, repair and disposal of nuclear submarines at nuclear shipbuilding and ship repair enterprises. *Medline.ru. Rossiyskiy biomeditsinskiy zhurnal = Russian Biomedical Journal*. 2013;14: 465-479. (In Russian).
 12. Pokhodzey LV, Matveev KM, Krupkin AB, Saenko SA, Dokhov MA. Working conditions and health status of personnel during the disposal of nuclear submarines and nuclear technological service vessels. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational medicine and industrial ecology*. 2015;9: 119-120. (In Russian).
 13. Simakov AV, Arefyeva DV, Abramov YuV, Proskuryakova NL, Kemsy IA, Shayakhmetova AA. Improvement of the regulatory provision of radiation safety of personnel during the disposal of ships with nuclear power plants and nuclear technological service vessels. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2021;66(4): 37-41. (In Russian).
 14. Simakov AV, Metlyaeva NA, Abramov YuV, Khazagerov SM, Arefyeva TI. Improvement of sanitary, hygienic and medical support for personnel of radiation-hazardous facilities. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational medicine and industrial ecology*. 2017;4: 37-41. (In Russian).
 15. Arefyeva DV, Baltrukova TB, Stepanov VV, Kozhukhova NA, Shayakhmetova AA. Hygienic assessment of working conditions of personnel of nuclear shipbuilding and ship repair enterprises in radioactive waste management. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational medicine and industrial ecology*. 2025;65(3): 165-173. (In Russian).
 16. Arefyeva DV, Stepanov VV, Kozhukhova NA, Petushok AV. A priori assessment of occupational health risks for personnel performing radioactive waste management work. Occupational hygiene: yesterday, today, tomorrow: proceedings of the full-time and part-time All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of the course «Occupational Hygiene» of the Department of Hygiene of conditions of upbringing, Education, Labor and Radiation Hygiene of the I.I. Mechnikov Northwestern State Medical University, St. Petersburg, May 22, 2025. St. Petersburg; 2025. P. 22-26. (In Russian).
 17. Verveda AB, Arefyeva DV, Avdienko GYu, Levkina EV, Stepanov VV. Assessment of the occupational risk to the health of certain categories of personnel engaged in radioactive waste management. Occupational hygiene: yesterday, today, tomorrow: proceedings of the full-time and part-time All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of the course «Occupational Hygiene» of the Department of Hygiene of conditions of upbringing, Education, Labor and Radiation Hygiene of the I.I. Mechnikov Northwestern State Medical University, St. Petersburg, May 22, 2025. St. Petersburg; 2025. P. 46-50. (In Russian).

Received: August 29, 2025

For correspondence: Darya V. Arefieva – Acting Head of Laboratory No. 1, Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine, Federal Medical and Biological Agency (65, Yuri Gagarin Avenue, Saint Petersburg, 196143, Russia; E-mail: lab1niipmm@yandex.ru); ORCID: 0000-0002-3879-8594, RSCI Author ID: 914975

Yuriy V. Grabsky – Director, Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine, Federal Medical and Biological Agency, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-8563-3290, RSCI Author ID: 534106

Tatyana B. Baltrukova – Leading Researcher of Laboratory No. 2, Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine, Federal Medical and Biological Agency, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-8726-7044, RSCI Author ID: 268265

Aleksandra V. Petushok - Junior Researcher of Laboratory No. 1, Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine, Federal Medical and Biological Agency, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-1017-1159, RSCI Author ID: 1060335

For citation: Arefieva D.V., Grabsky Yu.V., Baltrukova T.B., Petushok A.V. Radiation situation at workplaces of personnel during radioactive waste management at nuclear shipbuilding and ship repair enterprises. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 53–62. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-53-62

Поглощенные дозы в органах при компьютерной томографии с применением средств индивидуальной радиационной защиты на примере фантома пятилетнего ребенка

Дружинина П.С.¹, Шацкий И.Г.¹, Чипига Л.А.^{1,2,3}, Бажин С.Ю.¹, Шлеенкова Е.Н.¹, Алексеева Д.В.³, Волок О.И.³

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

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

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

Несмотря на международные рекомендации, в некоторых медицинских организациях сохраняется практика использования защитных фартуков, в том числе для детей. Существующие расчетные методы не позволяют оценить поглощенные дозы при использовании фартука, что делает актуальным прямое дозиметрическое исследование. Материалы и методы: Исследование выполнено с помощью фантома пятилетнего ребенка с использованием термолюминесцентных детекторов. Сканирование грудной клетки проводилось на томографе Somatom Force (Siemens, Германия, 2022 года производства) с вариантами использования фартука: без фартука; с фартуком, обернутым вокруг фантома; с фартуком в виде покрывала. Использованы наборы параметров сканирования: 1) фиксированное напряжение 70 кВ с модуляцией силы тока; 2) полностью автоматический режим. Результаты исследования и обсуждение: При обертывании фартуком наблюдалось как снижение доз в некоторых радиочувствительных органах, так и рост доз в других в 3–8 раз. Использование фартука в виде покрывала приводило к существенному росту доз для большинства радиочувствительных органов и тканей, включая органы полностью или частично закрытые фартуком (3–15 раз). В органах, частично закрытых фартуком, изменения доз в зависимости от варианта использования средств индивидуальной радиационной защиты были наиболее существенны: на автоматических режимах сканирования при использовании фартука, обернутого вокруг фантома, дозы в этих органах возросли в 1,1–4,2 раза в сравнении с дозами в тех же органах, но без использования средств индивидуальной радиационной защиты; при использовании фартука-покрывала дозы в органах, частично закрытых фартуком, увеличились в 4,5–8,5 раз. Заключение: Использование фартука при компьютерной-томографии приводит к снижению доз в одних органах, но сопровождается значительным (до 15 раз и более) ростом доз в других, особенно в автоматических режимах.

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты, компьютерная томография, защитный фартук, радиационная защита, поглощенная доза.

Введение

Несмотря на рекомендации авторитетных зарубежных профессиональных сообществ [1, 2] (Международное агентство по атомной энергии, Американская ассоциация медицинских физиков и др.) о нецелесообразности и опасности применения средств индивидуальной защиты (СИЗ) пациентов при проведении компьютерно-томографических исследований (КТ-исследований), в Российской Федерации в некоторых медицинских организациях все еще сохраняется практика использования защитных фартуков для защиты пациентов, в т.ч. детей, а также беременных женщин.

Международные регулирующие документы не рекомендуют применение СИЗ при КТ-исследованиях [1, 2]. СИЗ, находящиеся в зоне сканирования, могут приводить к значительным артефактам на КТ-изображении и существенному изменению параметров сканирования (увеличению напряжения рентгеновской трубки и начального значения силы тока) за счет особенностей работы программ автоматической модуляции силы тока и напряжения рентгеновской трубки (АМСТ) [3, 4]. Таким образом, в ряде зарубежных исследований было отмечено значительное увеличение поглощенных доз в отдельных органах и тканях при использовании СИЗ в области сканирования [5, 6]. Помимо этого, несколько зарубежных исследований показали нецелесооб-

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

разность применения СИЗ и вне зоны сканирования в случае применения программ АМСТ, так как существенного снижения поглощенных доз не наблюдалось [6–9]. Кроме того, в зарубежной литературе встречаются аргументы санитарно-эпидемиологического характера против использования СИЗ, а именно что СИЗ могут служить резервуаром и источником распространения для внутрибольничной инфекции [9, 10].

Существующие расчетные методы оценки поглощенных доз в КТ не дают возможность оценки доз при использовании СИЗ. В свою очередь, дозиметрия в фантоме предоставляет такую возможность. При этом термолюминесцентная (ТЛ) дозиметрия является наиболее распространенным и доступным методом, с помощью которого можно оценить влияние СИЗ на поглощенные дозы в радиочувствительных органах и тканях.

Цель исследования – оценка поглощенных доз при компьютерно-томографических исследованиях органов грудной клетки в зависимости от вариантов использования СИЗ на примере антропоморфного фантома пятилетнего ребенка.

Задачи исследования

1. Сканирование фантома пятилетнего ребенка с ТЛ-детекторами на томографе Somatom Force (Siemens, Германия, 2022 год производства) с разными режимами АМСТ при различных вариантах использования СИЗ.
2. Определение поглощенных доз при различных вариантах использования СИЗ на основании ТЛ-дозиметрии.
3. Оценка влияния расположения СИЗ на поглощенные дозы в радиочувствительных органах и тканях.

Материалы и методы

Антропоморфный фантом

Исследование было проведено на базе Отделения лучевой диагностики №1 ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России с помощью антропоморфного гетерогенного фантома, представляющего пятилетнего ребенка ростом 109 см и массой тела 19 кг [4, 11, 12]. Антропоморфный гетерогенный фантом пятилетнего ребенка состоит из аксиальных срезов толщиной 25 мм. Срезы фантома содержат отверстия для ТЛ-детекторов. Схема расположения и количество ТЛ-детекторов при каждом эксперименте (сканировании) представлена в таблице 1.

ТЛ-детекторы

Измерение поглощенных доз (ПД) в органах фантома проводилось с помощью ТЛ-детекторов ДТГ-4, толщиной ≈ 1 мм и диаметром 4,5 мм [13]. Считывание сигналов детекторов осуществлялось с помощью термолюминесцентного дозиметрического прибора «Harshaw» 2000D (США).

Калибровка детекторов производилась на эталонных установках ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в поле гамма-излучения источника ^{137}Cs в терминах поглощенной дозы в воздухе с учетом рассеяния излучения от водного фантома. Погрешность оценки коэффициента калибровки составляла 10 % с доверительной вероятностью 95 %. Дополнительная погрешность за счет энергетической зависимости показаний ТЛ-детекторов в поле рентгеновского излучения с напряжением на трубке 80–120 кВ не превышала 10 %. Общая погрешность определения коэффициента калибровки ТЛ-детекторов не превышала 15 %.

Таблица 1. Расположение и количество ТЛ-детекторов при каждом эксперименте (сканировании)
[Table 1. Layout and number of TL detectors in each experiment (scan)]

Орган [Organ]	Число ТЛД, шт. [Number of TLD, pcs.]
Головной мозг [Brain]	4
Глазные яблоки [Eyeballs]	2
Слюнные железы [Salivary glands]	2
Ротовая полость [Oral cavity]	1
Кости [Bones]	53
Щитовидная железа [Thyroid gland]	4
Пищевод [Esophagus]	6
Тимус [Thymus]	3
Легкие [Lungs]	28
Молочные железы [Breast]	2
Желудок [Stomach]	10
Печень [Liver]	14
Желчный пузырь [Gallbladder]	1
Надпочечники [Adrenal glands]	4
Селезенка [Spleen]	4
Поджелудочная железа [Pancreas]	3
Почки [Kidneys]	6
Тонкий кишечник [Small intestine]	4
Толстый кишечник [Large intestine]	9
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	5
Простата [Prostate]	1
Матка [Uterus]	1
Яички [Testes]	4
Яичники [Ovaries]	2
Лимфатические узлы [Lymph nodes]	2
Всего [Total]	171

Для определения органных доз в терминах поглощенной дозы в мягкой и костной тканях вышеуказанное значение коэффициента калибровки корректировалось путем деления на коэффициент перехода от значения кермы в воздухе к индивидуальному эквиваленту дозы для данного качества излучения (1,73 [14]), умножения на среднее значение отношения массовых коэффициентов поглощения рентгеновского излучения, генерируемого при напряжении на трубке 70–100 кВ, в мягкой ткани (1,086), в легких (1,005) и в костной ткани (5,72) и умножения на коэффициент, учитывающий изменение энергетической чувствительности ТЛ-детекторов, обусловленное спектром рентгеновского излучения и излучения ^{137}Cs (1,18 – для 70 кВ; 1,15 – для 100 кВ) [15, 16].

Для определения естественного фона использовалось 10 детекторов, которые во время проведения эксперимента располагались в комнате управления, все остальное время детекторы находились совместно.

Средние поглощенные дозы (СПД) в органах и тканях вычислялись как средние значения из показаний ТЛ-детекторов, расположенных в каждом органе, умноженные на коэффициент калибровки. При этом из показаний каждого рабочего детектора было вычтено усредненное значение показаний фоновых детекторов.

Использование СИЗ

Сканирование фантома с различными вариантами позиционирования защитного фартука было выполнено на стандартном КТ-протоколе грудной клетки для пятилетних детей, который используется для диагностики в КТ-отделении. Используемые варианты позиционирования: защитного фартука

- без фартука (эталон);
- с фартуком, обернутым, вокруг фантома;
- с фартуком в виде покрывала, накинутого поверх пациента.

Более подробно информация о позиционировании защитного фартука описана в предыдущей работе авторов [4].

В исследовании использовался защитный фартук РЕНЕКС ФРОс-0,5 с толщиной свинца 0,5 мм.

Протоколы сканирования для измерения поглощенных доз

Учитывая особенности работы АМСТ CareDose 4D и Care kV, применяемых в исследуемом КТ-сканере, для измерения ПД в органах с разными вариантами использования СИЗ были выбраны два набора параметров сканирования с использованием разных настроек.

Набор параметров 1: сканирование фантома с разными вариантами использования СИЗ проводилось с включенной программой Care Dose 4D, при этом для варианта 1 использования СИЗ Care kV была включена, а для вариантов 2 и 3 Care kV была выключена. В первом случае значение напряжения было выставлено вручную 70 кВ и оно было одинаково для всех трех вариантов сканирований (табл. 2). Одинаковое значение напряжения позволило создать схожие условия облучения для всех трех вариантов использования СИЗ. Модуляция силы тока была включена, так как является полезным инструментом для оптимизации дозы и используется также и при реально проводимых исследованиях. За счет создания схожих условий облучения при фиксированном напряжении набор параметров 1 являлся оптимальным для изучения влияния СИЗ на поглощенные дозы.

Таблица 2. Набор параметров 1 сканирования фантома
[Table 2. Parameter set 1 for phantom scanning]

Вариант использования СИЗ [PPE use case]	Вариант 1 [Option 1]	Вариант 2 [Option 2]	Вариант 3 [Option 3]
Напряжение, кВ Care kV вкл.(+)/выкл.(-) [Voltage, kV Care kV on (+)/off (-)]	70 +	70 –	70 –
Диапазон тока, мин мА-макс мА (CareDose 4D – вкл.(+)/выкл.(-) [Current range, min mA – max mA (CareDose 4D – on (+)/off (-)]	85-96 + (34 Eff.mAs)	40-156 + (23 Eff.mAs)	40-708 + (65 Eff.mAs)
Время оборота трубки, с [Tube rotation time, s]		0,5	
Толщина среза, мм Коллимация, мм [Slice thickness, mm Collimation, mm]		3 192 × 0,6	
Питч [Pitch]		1,4	
Длина сканирования, мм [Scan length, mm]		175	
Высота стола, мм [Table height, mm]		100	

Набор параметров 2: сканирование фантома с разными вариантами использования СИЗ проводилось с включенными программами CareDose 4D и Care kV (табл. 3). Данная серия сканирований является отражением реальной медицинской практики, так как большинство КТ-сканирований

проводятся на полностью автоматических режимах. Серия сканирований с использованием набора параметров 2 отражает то, как будут меняться ПД в органах при использовании СИЗ в реальной практике в медицинском учреждении.

Таблица 3. Набор параметров 2 сканирования фантома
[Table 3. Parameter set 2 for phantom scanning]

Вариант использования СИЗ [PPE use case]	Вариант 1 [Option 1]	Вариант 2 [Option 2]	Вариант 3 [Option 3]
Напряжение, кВ Care kV вкл.(+)/выкл.(-) [Voltage, kV Care kV on (+)/off (-)]	70 +	80 +	100 +
Диапазон тока, мин мА-макс мА (CareDose 4D – вкл.(+)/выкл.(-) [Current range, min mA – max mA (CareDose 4D – on (+)/off (-)]	85-96 + (34 Eff.mAs)	57-305 + (54 Eff.mAs)	32-245 + (83 Eff.mAs)

Вариант использования СИЗ [PPE use case]	Вариант 1 [Option 1]	Вариант 2 [Option 2]	Вариант 3 [Option 3]
Время оборота трубки, с [Tube rotation time, s]		0,5	
Толщина среза, мм Коллимация, мм [Slice thickness, mm Collimation, mm]		3 192 × 0,6	
Питч [Pitch]		1,4	
Длина сканирования, мм [Scan length, mm]		175	
Высота стола, мм [Table height, mm]		100	

Для достижения минимального порога детектирования измерений ТЛ-детекторов в диапазоне низких доз (порядка 0,1 мЗв) каждый вариант сканирования фантома включал серию из 11 сканирований с одинаковыми параметрами. При представлении и оценке результатов полученные значения ПД были приведены к одному сканированию.

Сканирование фантома проводилось на технически пригодном аппарате. Техническая пригодность аппарата определялась верификацией значения объемного компьютерного томографического индекса дозы (CTDI_{vol}). Методика проведения верификации CTDI_{vol} подробно описана в предыдущей работе [4].

Статистическая обработка данных

Статистическая обработка данных была выполнена с помощью Microsoft Excel. Вычисление процентных отклонений

ПД в органах и тканях (d) в сравнении с эталонными ПД было выполнено с помощью выражения:

$$d = \frac{\text{СПД}_{\text{СИЗ}} - \text{СПД}_{\text{эталон}}}{\text{СПД}_{\text{эталон}}} \times 100 \%,$$

где СПД_{СИЗ} – средняя ПД в органе фантома при сканировании с одним из вариантов использования СИЗ; СПД_{эталон} – средняя ПД в органе фантома при сканировании без использования СИЗ.

Результаты и обсуждение

СПД в органах, полученные при сканировании фантома пятилетнего ребенка при использовании набора параметров 1 (таблица 2), представлены в таблице 4 и на рисунке 1.

Таблица 4. Средние поглощенные дозы в органах и процентные отклонения (d), полученные при сканировании фантома пятилетнего ребенка при использовании набора параметров 1.

[Table 4. Average absorbed doses in organs and percentage deviations (d) obtained when scanning a 5-year-old child phantom using parameter set 1]

Вариант использования СИЗ [Option for using PPE]	Вариант 1 [Option 1]	Вариант 2 [Option 1]	Вариант 3 [Option 1]
Орган [Organ]	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]
Головной мозг [Brain]	0,09 / 0,01	0,06 / 0,006	0,1 / 0,01
Глазные яблоки [Eyeballs]	0,12 / 0,01	0,4 / 0,007	0,13 / 0,01
Слюнные железы [Salivary glands]	0,7 / 0,06	0,4 / 0,04	0,5 / 0,05
Ротовая полость [Oral cavity]	0,5 / 0,05	0,38 / 0,34	0,4 / 0,04
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	18 / 1,7	8,8 / 0,8	5,9 / 0,5
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	26 / 2,3	20 / 1,8	30 / 2,7
Поясничный отдел позвоночника* [Lumbar spine]	16 / 1,48	17 / 1,5	72 / 6,6
Крестцовый отдел позвоночника* [Sacral spine]	0,3 / 0,03	0,13 / 0,01	1,5 / 0,1
Щитовидная железа [Thyroid gland]	10 / 0,9	3,8 / 0,35	4,5 / 0,41
Лимфатический узел [Lymph node]	7,7 / 0,7	2,6 / 0,2	3 / 0,3
Пищевод [Esophagus]	7,8 / 0,7	4,7 / 0,4	11 / 1
Тимус [Thymus]	7,6 / 0,7	3,5 / 0,3	5,3 / 0,5

Вариант использования СИЗ [Option for using PPE]	Вариант 1 [Option 1]	Вариант 2 [Option 1]	Вариант 3 [Option 1]
Орган [Organ]	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]
Легкие [Lungs]	6,8 / 0,6	5,5 / 0,5	-18 %
Молочные железы [Breast]	7,9 / 0,7	3,8 / 0,4	-51 %
Желудок* [Stomach]	4,7 / 0,4	5,5 / 0,5	16 %
Печень* [Liver]	5,9 / 0,5	8,1 / 0,7	39 %
Желчный пузырь* [Gallbladder]	2 / 0,2	2,5 / 0,2	15 %
Надпочечники* [Adrenal glands]	3,8 / 0,34	3,6 / 0,3	-3 %
Селезенка* [Spleen]	5,1 / 0,5	6,2 / 0,6	22 %
Поджелудочная железа [Pancreas]	5,2 / 0,5	6,9 / 0,6	35 %
Почки* [Kidneys]	3,0 / 0,27	3,2 / 0,3	9 %
Тонкий кишечник* [Small intestine]	0,73 / 0,07	0,9 / 0,08	22 %
Толстый кишечник* [Large intestine]	0,38 / 0,03	0,4 / 0,04	18 %
Мочевой пузырь* [Urinary bladder]	0,02 / 0,002	0,02 / 0,0017	-16 %
Простата* [Prostate gland]	0 / 0	0 / 0	0 %
Матка* [Uterus]	0,01 / 0,001	0,01 / 0,0005	-42 %
Яички* [Testes]	0 / 0	0 / 0	-
Яичники* [Ovaries]	0,04 / 0,004	0,03 / 0,002	-37 %

*Органы, которые полностью или частично были закрыты свинцовым фартуком. Частично были закрыты: поясничный отдел позвоночника, желудок, печень, надпочечники, селезенка, почки [*Organs that were fully or partially covered by the lead apron. Partially covered were: lumbar spine, stomach, liver, adrenal glands, spleen, kidneys].

При сканировании фантома без СИЗ наибольшие дозы были зафиксированы в позвоночнике (1,7 мГр в шейном отделе, 1,5 в поясничном и 2,3 в грудном отделе), что связано с поглощением энергии излучения в костной ткани; также высокие дозы были зафиксированы в других органах, которые полностью или частично попадали в область сканирования: пищевод, тимус, легкие, молочные железы, печень, селезенка, поджелудочная железа, щитовидная железа, желудок, почки, надпочечники, желчный пузырь (дозы варьировали от 0,2 до 0,9 мГр); дозы за счет рассеянного излучения менее 0,1 мГр были в органах, которые не входили в область сканирования. Обертывание фантома фартуком (вариант 2) приводило к снижению доз для ряда радиочувствительных органов до 50 %, таких как шейный и грудной отдел позвоночника, щитовидная железа, пищевод, тимус, легкие и молочные железы. Однако использование СИЗ в таком виде также приводило к увеличению дозы в печени, желудке, желчном пузыре, селезенке, поджелудочной железе и в почках до 40 %, что связано с автоматическим повышением силы тока из-за поглощения излучения фартуком и отработыванием АМСТ для его компенсации [4].

Использование фартука в виде покрывала (вариант 3) приводило к еще более значимым повышению поглощенных доз в радиочувствительных органах и тканях (в 6–8 раз), что приводило к дозе выше 6,6 мГр в поясничном отделе позвоночника, а также к дозе 2,7 мГр в грудном отделе позвоночника, желудке, печени, селезенке и поджелудочной железе, что не компенсировалось снижением доз в других радиочувствительных органах и тканях. Такое значительное повышение доз связано с геометрией облучения пациента при проведении КТ: рентгеновская трубка вращается вокруг пациента на 360°, а фартук, лежащий сверху, не только не защищает пациента, когда трубка находится снизу, но и способствует рассеянному облучению. В органах, находящихся непосредственно в области сканирования (пищевод, тимус, лёгкие, молочные железы), поглощенные дозы были в диапазоне 0,6–1,4 мГр с учетом роста дозы (в пределах 2 раз) при использовании разных вариантов использования СИЗ.

Поглощенные дозы в органах, полученные при сканировании фантома пятилетнего ребенка при использовании набора параметров 2 (табл. 3), представлены в таблице 5 и на рисунке 2.

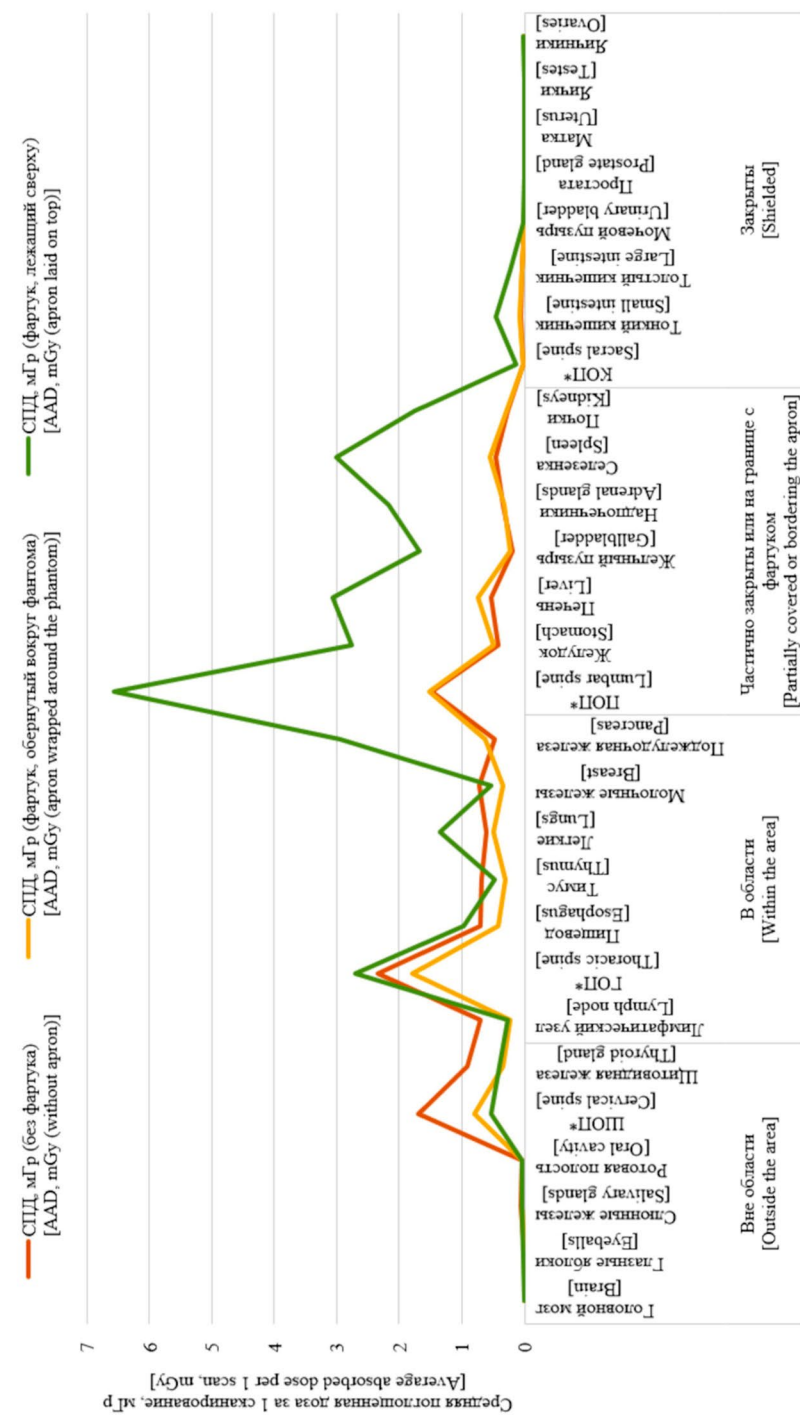


Таблица 5. Средние поглощенные дозы в органах и процентные отклонения (d), полученные при сканировании фантома пятилетнего ребенка при использовании набора параметров 2

[Table 5. Average absorbed doses in organs and percentage deviations (d) obtained when scanning a 5-year-old child phantom using parameter set 2]

Вариант использования СИЗ [Option for using PPE]	Вариант 1 [Option 1]	Вариант 2 [Option 1]		Вариант 3 [Option 1]	
Орган [Organ]	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]	d	СПД, мГр/СПД за 1 сканирование [AAD, mGy AAD, mGy/SPD per 1 scan]	d
Головной мозг [Brain]	0,09 / 0,008	0,2 / 0,02	86 %	0,32 / 0,03	240 %
Глазные яблоки [Eyeballs]	0,12 / 0,01	0,2 / 0,02	90 %	0,4 / 0,03	220 %
Слюнные железы [Salivary glands]	0,67 / 0,06	0,8 / 0,07	15 %	1,2 / 0,1	77 %
Ротовая полость [Oral cavity]	0,53 / 0,05	0,9 / 0,09	82 %	0,7 / 0,07	40 %
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	19 / 1,7	19,3 / 1,8	4 %	19 / 1,8	4 %
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	26 / 2,3	39,6 / 3,6	54 %	45 / 4,1	74 %
Поясничный отдел позвоночника* [Lumbar spine]	16 / 1,5	41,5 / 3,7	160 %	77 / 7,1	380 %
Крестцовый отдел позвоночника* [Sacral spine]	0,3 / 0,03	0,7 / 0,07	160 %	2,7 / 0,3	860 %
Щитовидная железа [Thyroid gland]	10 / 0,9	8,8 / 0,8	-13 %	9,8 / 0,9	-3 %
Лимфатический узел [Lymph node]	7,7 / 0,7	7,9 / 0,73	3 %	9,3 / 0,8	21 %
Пищевод [Esophagus]	7,8 / 0,7	11 / 1	42 %	13 / 1,2	65 %
Тимус [Thymus]	7,6 / 0,7	9,5 / 0,86	26 %	10 / 0,9	34 %
Легкие [Lungs]	6,7 / 0,6	11,9 / 1,08	77 %	14 / 1,3	109 %
Молочные железы [Breast]	7,8 / 0,7	7,9 / 0,73	1 %	8,8 / 0,8	13 %
Желудок* [Stomach]	4,7 / 0,4	15,9 / 1,45	240 %	35 / 3,14	630 %
Печень* [Liver]	5,8 / 0,5	19,2 / 1,74	230 %	37 / 3,4	540 %
Желчный пузырь* [Gallbladder]	2,2 / 0,2	9,2 / 0,84	330 %	15 / 1,34	590 %
Надпочечники* [Adrenal glands]	3,8 / 0,3	10 / 0,95	180 %	23 / 2,4	500 %
Селезенка* [Spleen]	5 / 0,5	14 / 1,3	180 %	34 / 3,1	580 %
Поджелудочная железа [Pancreas]	5,2 / 0,47	16 / 1,4	200 %	40 / 3,7	680 %
Почки* [Kidneys]	2,9 / 0,27	7,9 / 0,7	170 %	21 / 1,9	620 %
Тонкий кишечник* [Small intestine]	0,7 / 0,07	1,3 / 0,1	81 %	6,3 / 0,6	760 %
Толстый кишечник* [Large intestine]	0,4 / 0,04	2,3 / 0,2	510 %	3,4 / 0,31	790 %
Мочевой пузырь* [Urinary bladder]	0,02 / 0,002	0,1 / 0,009	370 %	0,3 / 0,03	1200 %
Простата* [Prostate gland]	0 / 0	0,05 / 0,004	–	0,05 / 0,005	–
Матка* [Uterus]	0,01 / 0,001	0,08 / 0,008	750 %	0,2 / 0,02	1646 %
Яички* [Testes]	0 / 0	0,03 / 0,003	–	0,04 / 0,004	–
Яичники* [Ovaries]	0,04 / 0,004	0,13 / 0,012	210 %	0,4 / 0,04	872 %

*Органы, которые полностью или частично были закрыты свинцовым фартуком. Частично были закрыты: поясничный отдел позвоночника, желудок, печень, надпочечники, селезенка, почки [*Organs that were fully or partially covered by the lead apron. Partially covered were: lumbar spine, stomach, liver, adrenal glands, spleen, kidneys].

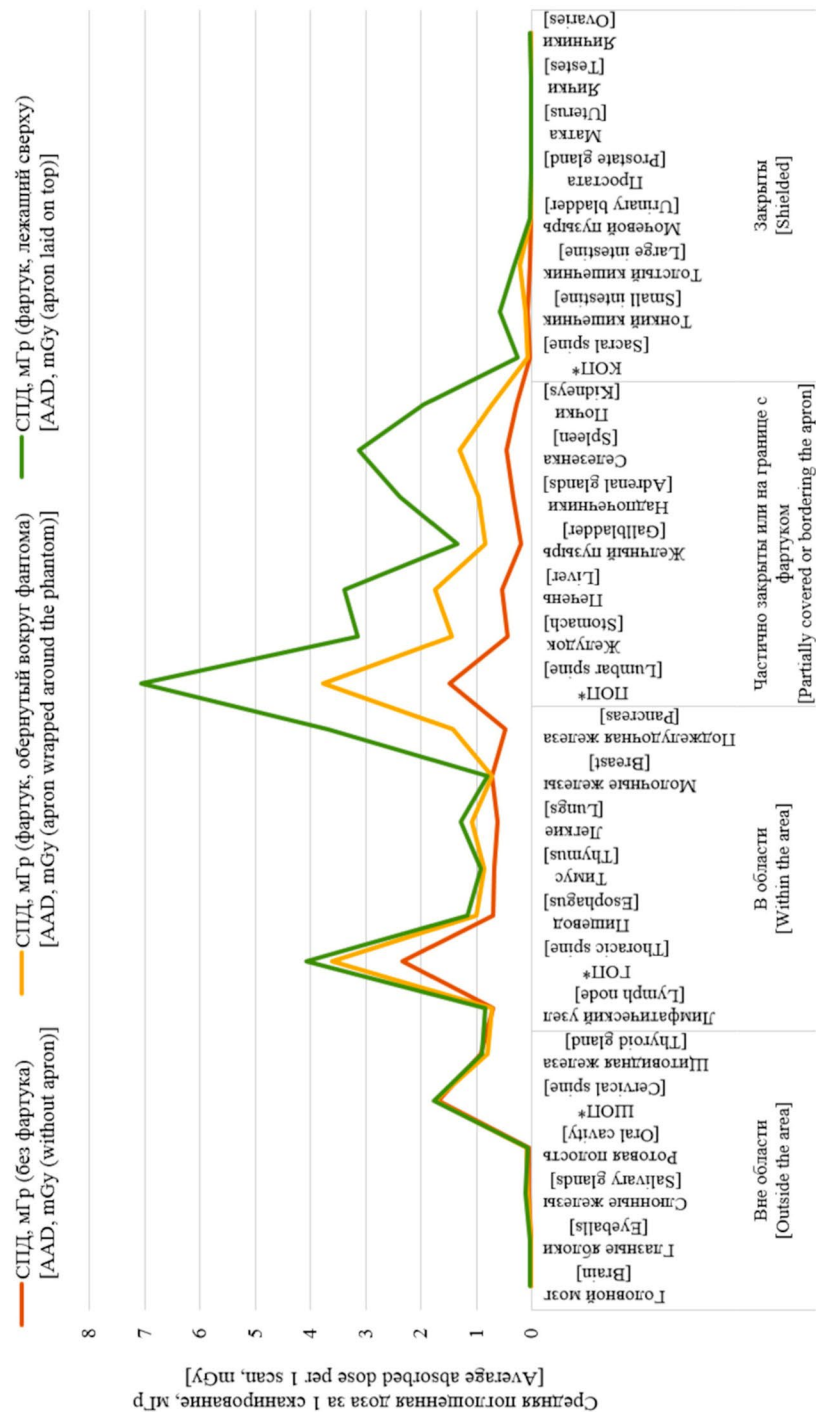


Рис. 2. СЦД в органах (таблица 5), полученные при сканировании фантома пятилетнего ребенка при использовании набора параметров 2 [Fig. 2. Absorbed doses in organs (Table 5) obtained during scanning of the 5-year-old child phantom using parameter set 2]

*ШОП – шейный отдел позвоночника, ГОП – грудной отдел позвоночника, ПОП – поясничный отдел позвоночника

При использовании клинического протокола, который используется на практике и адаптирует напряжение под параметры зоны сканирования и антропометрические характеристики пациента, основные закономерности изменения СПД в органах схожи с изменениями СПД при фиксированных значениях напряжения (набор параметров 1, табл. 4, рис. 1). Однако в данной серии сканирований при использовании СИЗ отклонения СПД от эталонных значений были более выражены.

Аналогично сканированию на первом протоколе при сканировании фантома без СИЗ наибольшие дозы (1,5–2,4 мГр) были зафиксированы в позвоночнике, а также в других органах, полностью или частично попавших в область сканирования: пищевод, тимус, легкие, молочные железы, печень, селезенка, поджелудочная железа, щитовидная железа, желудок, почки, надпочечники, желчный пузырь (0,2–0,9 мГр); в органах вне зоны сканирования дозы рассеянного излучения не превышали 1 мГр. Обертывание фантома фартуком (вариант 2) приводило к снижению дозы только в щитовидной железе (-13 % в сравнении с эталоном). Для ряда радиочувствительных органов, таких как шейный и грудной отделы позвоночника, пищевод, тимус, легкие и молочные железы, дозы выросли в диапазоне от 4 % до 77 %. Значительное увеличение поглощенных доз (в 3–4 раза) было зафиксировано в желчном пузыре, желудке, печени, поджелудочной железе, селезенке и почках, что связано с автоматическим повышением силы тока и напряжения (автоматическое повышение с 70 кВ до 80 кВ) из-за поглощения излучения фартуком как и при использовании протокола с постоянным напряжением. Использование фартука в виде покрывала (вариант 3) приводило к автоматическому увеличению напряжения до 100 кВ и силы тока и еще более значимым повышением поглощенных доз в радиочувствительных органах и тканях относительно эталонных значений СПД (в 6–11 раз); СПД в поясничном отделе позвоночника превышала 7 мГр, также высокие дозы (3,2–4,1 мГр) были определены в грудном отделе позвоночника, поджелудочной железе, печени, желудке и селезенке.

Заключение

В работе было проведено сканирование фантома пятилетнего ребенка на разных режимах сканирования с использованием СИЗ и без. Наибольшие дозы были определены в позвоночнике (1,5–2,4 мГр), а также в других органах, попадающих в область сканирования: легкие, молочные железы, пищевод, тимус, лимфатические узлы, поджелудочная железа, желудок, печень, желчный пузырь, надпочечники, селезенка и почки (0,2–0,9 мГр).

При обертывании защитным фартуком наблюдалось как снижение доз в некоторых радиочувствительных органах, так и рост доз в других в 3–8 раз за счет работы систем автоматической модуляции силы тока и напряжения. Использование фартука в виде покрывала приводило к существенному росту доз для большинства радиочувствительных органов и тканей, включая органы полностью или частично закрытые фартуком, где рост доз варьировал от 3 до 15 раз.

В органах, частично закрытых фартуком, изменения доз в зависимости от варианта использования СИЗ были наиболее существенны: на полностью автоматических режимах сканирования при использовании фартука, обернутого вокруг фантома, дозы в этих органах возросли в 1,1–4,2 раза

в сравнении с дозами в тех же органах, но без использования СИЗ; при использовании фартука-покрывала дозы в органах, частично закрытых фартуком, увеличились в 4,5–8,5 раз. Это наиболее значимо для органов, находящихся в зоне сканирования, где дозы за одно сканирование возросли до 7 мГр в позвоночнике и до 3–4 мГр в печени, железу, поджелудочной железе и селезенке.

Результаты исследования показали, что использование свинцового фартука может привести не к снижению дозы в органах, а, наоборот, к существенному ее увеличению, в том числе при использовании программ автоматической модуляции силы тока и напряжения, что требует дальнейшего изучения.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Дружинина П.С. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, обработка данных, написание статьи, оформление окончательного варианта статьи для публикации в журнал.

Шацкий И.Г. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, обработка данных, написание статьи, оформление окончательного варианта статьи для публикации в журнал.

Чипига Л.А. – осуществление общего научного руководства исследованием, обсуждение и анализ результатов, редакция промежуточного варианта статьи.

Бажин С.Ю. – организация помощи в работе с ТЛ-дозиметрами, снятие показаний с ТЛ-дозиметров, редакция промежуточного варианта статьи.

Шлеенкова Е.Н. – организация помощи в работе с ТЛ-дозиметрами, снятие показаний с ТЛ-дозиметров.

Сергеева В.Ю. – организация помощи в работе с ТЛ-дозиметрами, снятие показаний с ТЛ-дозиметров.

Алексеева Д.В. – организация проведения экспериментальной работы в КТ-отделении.

Волок О.И. – организация проведения экспериментальной работы в КТ-отделении.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения отраслевой НИР «Разработка методов индивидуализированной оценки доз облучения пациентов и персонала в лучевой диагностике и терапии».

Литература

1. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP recommendations for ending routine gonadal shielding during abdominal and pelvic radiography, 2021. 120 p.
2. American Association of Physicists in Medicine. Patient gonadal and fetal shielding in diagnostic imaging frequently asked questions, 2019. 8 p. URL: https://www.aapm.org/org/policies/documents/CARES_FAQs_Patient_Shielding.pdf (Дата обращения: 15.04.2026).
3. Stearns B.K., Seitz K., Folck Q.M. Exploring past to present shielding guidelines // Radiological Physics and Technology. 2023. No 95(2). P. 84–93.
4. Шацкий И.Г., Дружинина П.С., Чипига Л.А., Алексеева Д.В. Оценка влияния средств индивидуальной защиты на работу программ автоматической модуляции силы тока и

- напряжения при проведении компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 69–80. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-69-80.
5. Begano D., Söderberg M., Bolejko A. To use or not use patient shielding on pregnant women undergoing CT pulmonary angiography: a phantom study // Radiation Protection Dosimetry. 2020. Vol. 189(4). P. 458-465. DOI: 10.1093/rpd/ncaa059.
 6. Samara E.T., Saltybaeva N., Sans Merce M. et al. Systematic literature review on the benefit of patient protection shielding during medical X-ray imaging: towards a discontinuation of the current practice // Physica Medica. 2022. Vol. 94. P. 102-109. DOI: 10.1016/j.ejmp.2021.12.016.
 7. Geist J.R. This far but no farther: elimination of protective radiation shielding for dental patients // Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology. 2020. Vol. 130(4). P. 347-349. DOI: 10.1016/j.oooo.2020.05.016.
 8. Kim J.-S., Kwon S.-M., Kim J.-M., Yoon S.-W. New organ-based tube current modulation method to reduce the radiation dose during computed tomography of the head: evaluation of image quality and radiation dose to the eyes in the phantom study // Radiologia Medica. 2017. Vol. 122(8). P. 601-608. DOI: 10.1007/s11547-017-0755-5.
 9. Yu L., Bruesewitz M.R., Vrieze T.J., McCollough C.H. Lead Shielding in Pediatric Chest CT: Effect of Apron Placement Outside the Scan Volume on Radiation Dose Reduction // American Journal of Roentgenology. 2019. Vol. 212, No 1. P. 151-156. DOI: 10.2214/AJR.17.19405.
 10. Boyle H., Strudwick R.M. Do lead rubber aprons pose an infection risk? // Radiography. 2010. Vol. 16(4). P. 297-303. DOI: 10.1016/j.radi.2010.03.002.
 11. Varchena V. Pediatric phantoms // Pediatric Radiology Journal. 2002. No 32. P. 280–284.
 12. Варченя В.Ж., Воеводина А.И., Губатова Д.Я. и др. Тканеэквивалентные дозиметрические фантомы и измерение поглощенных органами доз при рентгенологических исследованиях детей. Рига, Латвия: 1989. 93 с.
 13. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». ООО «Центротех-инжиниринг». Термолюминесцентные монокристаллические детекторы ДТГ-4. Паспорт ТУ 95 2511-94. 2025. 13 с.
 14. Государственная система обеспечения единства измерений. Комплексы дозиметрические термолюминесцентные «ДОЗА-ТЛД». Методика поверки ФВКМ.412118.010МП. 2018. 11 с.
 15. Bassi P., Busuoli G. and Rimondi O. Calculated energy dependence of some RTL and RPL detectors // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. 1976. Vol. 27(5–6). P. 291–305. DOI: 10.1016/0020-708X(76)90146-0.
 16. Chipiga L., Golikov V., Vodovatov A., Bernhardsson C. Comparison of organ absorbed doses in whole-body computed tomography scans of paediatric and adult patient models estimated by different methods // Radiation Protection Dosimetry. 2021. Vol. 195, No 3-4. P. 246-256. DOI: 10.1093/rpd/ncab086. PMID: 34132330.

Поступила: 15.04.2026

Дружинина Полина Сергеевна – научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: druzhininapauline@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2921-067X, РИНЦ Author ID: 1065090

Шацкий Илья Геннадьевич – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; ORCID: 0000-0003-2809-0223, РИНЦ Author ID: 652924

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, ведущий 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; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0001-9153-3061, РИНЦ Author ID: 859729

Бажин Степан Юрьевич – заведующий лабораторией радиационного контроля, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0003-1778-4334, РИНЦ Author ID: 1087210

Шлеенкова Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID 0009-0006-6391-1639, РИНЦ Author ID: 1246203

Алексеева Дарья Владимировна – заведующая отделением лучевой диагностики № 1 отдела лучевой диагностики Университетской клиники Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0001-9528-9377

Волок Оксана Игоревна – инженер отделения лучевой диагностики № 1 отдела лучевой диагностики Университетской клиники Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0000-3365-608X

Для цитирования: Дружинина П.С., Шацкий И.Г., Чипига Л.А., Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Алексеева Д.В., Волок О.И. Поглощенные дозы в органах при компьютерной томографии с применением средств индивидуальной радиационной защиты на примере фантома пятилетнего ребенка // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 63–74. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-63-74

Absorbed organ doses in computed tomography using personal radiation protective equipment: a phantom study of a five-year-old child

Polina S. Druzhinina¹, Ilya G. Shatsky¹, Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Stepan Yu. Bazhin¹, Ekaterina N. Shleenkova¹, Darya V. Alekseeva³, Oksana I. Volok³

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

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

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

Despite international recommendations, some medical organizations continue the practice of using protective aprons, including for children. Existing calculation methods do not allow for the assessment of absorbed doses when using an apron, which makes direct dosimetric research relevant. Materials and Methods: The study was performed using a phantom of a 5-year-old child with thermoluminescent detectors. Chest scanning was conducted on a Somatom Force tomograph (Siemens, Germany, manufactured in 2022) with three apron use options: without an apron; with an apron wrapped around the phantom; and with an apron used as a blanket. Two scanning parameter sets were used: 1) fixed voltage of 70 kV with tube current modulation; 2) fully automatic mode. Results and Discussion: Wrapping the apron resulted in both dose reduction in some radiosensitive organs and dose increase in others by a factor of 3–8. Using the apron as a blanket led to a substantial dose increase for the majority of radiosensitive organs and tissues, including organs fully or partially covered by the apron (3–15 times). In organs partially covered by the apron, dose changes depending on the PPE use case were most pronounced: in automatic scanning modes, when using the apron wrapped around the phantom, doses in these organs increased by a factor of 1.1–4.2 compared to doses in the same organs without protective apron; when using the apron as a blanket, doses in organs partially covered by the apron increased by a factor of 4.5–8.5. Conclusion: The use of an apron during computed tomography reduces doses in some organs but is accompanied by a significant (up to 15 times or more) increase in doses in others, especially in automatic modes.

Key words: computed tomography, patient, radiation protection, personal protective equipment, protective apron, absorbed dose.

Authors' personal contribution

Druzhinina P.S. – developing a research design, defining the research objectives and goals, analyzing data, writing the article, and preparing the final draft of the article for journal publication.

Shatsky I.G. – developing a research design, defining the research objectives and goals, analyzing data, writing the article, and preparing the final draft of the article for journal publication.

Chipiga L.A. – providing overall scientific guidance for the research, discussing and analyzing the results, and editing the draft manuscript.

Bazhin S.Yu. – organizing of assistance in working with TL-dosimeters, reading data from TL-dosimeters, and editing the draft manuscript.

Shleenkova E.N. – organizing of assistance in working with TL-dosimeters, reading data from TL-dosimeters.

Alekseeva D.V. – organizing experimental work in the CT department.

Volok O.I. – organizing experimental work in the CT department.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The article was prepared as part of the applied research project "Development of methods for individualized assessment of radiation doses to patients and staff in radiological diagnostics and therapy".

References

1. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP recommendations for ending routine gonadal shielding during abdominal and pelvic radiography. 2021; 120 p.
2. American Association of Physicists in Medicine. Patient gonadal and fetal shielding in diagnostic imaging frequently

Polina S. Druzhinina

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

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

- asked questions; 2019. 8 p. Available from: https://www.aapm.org/org/policies/documents/CARES_FA_Qs_Patient_Shielding.pdf [Accessed 15.04.2026].
3. Stearns BK, Seitz K, Folck QM. Exploring past to present shielding guidelines. *Radiological Physics and Technology*. 2023;95(2): 84-93.
 4. Shatsky IG, Druzhinina PS, Chipiga LA, Alekseeva DS. Evaluation of the impact of personal protective equipment on the automatic exposure control system in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026;19(1): 69–80. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-69-80.
 5. Begano D, Söderberg M, Bolejko A. To use or not use patient shielding on pregnant women undergoing CT pulmonary angiography: a phantom study. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020;189(4): 458-465. DOI: 10.1093/rpd/ncaa059.
 6. Samara ET, Saltybaeva N, Sans Merce M, Gianolini S, Ith M. Systematic literature review on the benefit of patient protection shielding during medical X-ray imaging: towards a discontinuation of the current practice. *Physica Medica*. 2022;94: 102-109. DOI: 10.1016/j.ejmp.2021.12.016.
 7. Geist JR. This far but no farther: elimination of protective radiation shielding for dental patients. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*. 2020;130(4): 347-349. DOI: 10.1016/j.oooo.2020.05.016.
 8. Kim J-S, Kwon S-M, Kim J-M, Yoon S-W. New organ-based tube current modulation method to reduce the radiation dose during computed tomography of the head: evaluation of image quality and radiation dose to the eyes in the phantom study. *Radiologia Medica*. 2017;122(8): 601-608. DOI: 10.1007/s11547-017 0755-5.
 9. Yu L, Bruesewitz MR, Vrieze TJ, McCollough CH. Lead Shielding in Pediatric Chest CT: Effect of Apron Placement Outside the Scan Volume on Radiation Dose Reduction. *American Journal of Roentgenology*. 2019;212(1): 151-156. DOI: 10.2214/AJR.17.19405.
 10. Boyle H, Strudwick RM. Do lead rubber aprons pose an infection risk? *Radiography*. 2010;16(4): 297-303. DOI: 10.1016/j.radi.2010.03.002
 11. Varchena V. Pediatric phantoms. *Pediatric Radiology Journal*. 2002;32: 280–284.
 12. Varchenya VZh, Voevodina AI, Gubatova DYa, Krastynia AK, Nemiro EA, Kalnitsky SA, et al. Tissue-equivalent dosimetric phantoms and measurement of absorbed doses by organs in radiological examinations of children. Riga, Latvia; 1989. 93 p. (In Russian).
 13. State Atomic Energy Corporation Rosatom. Centrotech-Engineering LLC. Thermoluminescent single-crystal detectors DTG-4. Passport according to Technical Specifications TU 95 2511-94. 2025. 13 p. (In Russian).
 14. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Thermoluminescent Dosimetric Complexes "DOZA-TLD". Verification Method FVKM.412118.010MP. 2018. 11 p. (In Russian).
 15. Bassi P, Busuoli G, Rimondi O. Calculated energy dependence of some RTL and RPL detectors. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 1976;27(5-6): 291–305. DOI: 10.1016/0020-708X(76)90146-0.
 16. Chipiga L, Golikov V, Vodovatov A, Bernhardsson C. Comparison of organ absorbed doses in whole-body computed tomography scans of paediatric and adult patient models estimated by different methods. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;195(3-4): 246-256. DOI: 10.1093/rpd/ncab086. PMID: 34132330.

Received: April 15, 2026

For correspondence: Polina S. Druzhinina – 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 (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: druzhininapauline@gmail.com); ORCID: 0000-0003-2921-067X, RSCI Author ID: 1065090

Ilya G. Shatsky – senior 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: 0000-0003-2809-0223, RSCI Author ID: 652924

Larisa A. Chipiga – Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow, Laboratory of Radiation Hygiene of Medical Facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; research fellow, A.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, RSCI Author ID: 859729

Stepan Yu. Bazhin – Head of the Laboratory of Radiation Control, Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0003-1778-4334, RSCI Author ID: 1087210

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, RSCI Author ID: 1246203

Daria V. Alekseeva – Head of Radiation Diagnostics Department No. 1, Department of Radiation Diagnostics, University Clinic of the Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0001-9528-9377

Oksana I. Volok – Engineer of Radiation Diagnostics Department No. 1, Department of Radiation Diagnostics, University Clinic of the Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0000-3365-608X

For citation: Druzhinina P.S., Shatsky I.G., Chipiga L.A., Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., D.V. Alekseeva, Volok O.I. Absorbed organ doses in computed tomography using personal radiation protective equipment: a phantom study of a five-year-old child. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 63–74. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-63-74

Определение морфометрических характеристик костного мозга и кости с целью создания дозиметрической модели высокого разрешения

Шарагин П.А.^{1,2}, Ахмадуллин Р.М.¹, Толстых Е.И.¹, Шишкина Е.А.^{1,2}

¹ Южно-Уральский Федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики
Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Остеогенные и гемопоэтические стволовые клетки могут подвергаться облучению при радиотерапии раковых заболеваний с использованием радиофармпрепаратов, в случае адсорбции радионуклидов в кости. Оценка доз на нормальные радиочувствительные клетки важна для оценки соотношения польза/ущерб. Поэтому создание дозиметрической модели кости и костного мозга с учетом микрораспределения радионуклидов, и клеток-мишеней является важной задачей. Цель исследования — провести аналитический обзор современного уровня знаний о гистоморфометрических характеристиках трабекулярной кости и прилегающих участков костного мозга с целью создания анатомо-морфологического базиса для построения микродозиметрической модели для расчетов доз на гемопоэтические стволовые клетки и остеобласты. Материалы и методы: Проводился поиск опубликованных данных по структуре и минерализации костной ткани в составе трабекулярной кости, клеточному составу костного мозга, морфологии и расположению клеток в его объеме относительно поверхности кости. Результаты исследования и обсуждение: В настоящее время морфологические особенности минерализации кости и размеры соответствующих структур хорошо изучены. Поверхность трабекул покрыта слоем неминерализованного костного матрикса толщиной 1–5 мкм, который способен быстро адсорбировать радионуклиды. К этому слою прилегает слой остеобластов толщиной 1 мкм. Данные о распределении стволовых клеток в объеме костного мозга весьма ограничены. Известно, что большая часть стволовых расположена в пределах 200 мкм от поверхности трабекул. Размер клеток составляет 6–7 мкм. Заключение: На основе существующих знаний о структуре кости и распределении в костном мозге остеогенных и гемопоэтических стволовых клеток планируется построить модель, состоящую из слоев, включающих слой-источник и слой-мишени, описывающие остеогенные клетки и гемопоэтические стволовые клетки на различном удалении от кости.

Ключевые слова: гемопоэтические стволовые клетки, остеобласты, трабекулярная кость, дозиметрия, радиофармпрепараты.

Введение

Гемопоэтические стволовые клетки (ГСК), а также остеогенные клетки могут давать начало злокачественным новообразованиям после воздействия ионизирующего излучения. Они могут подвергаться облучению при радиотерапии раковых заболеваний с использованием радиофармпрепаратов, в случае адсорбции радионуклидов в кости. В этой связи важны максимально точные оценки доз на чувствительные клетки-мишени при различных условиях внутреннего облучения.

ГСК и остеогенные клетки находятся в красном костном мозге (ККМ), а доза облучения ГСК обычно принимается равной средней дозе на ККМ. Однако, в ряде работ показано, что ГСК неравномерно распределены в объеме ККМ [1, 2]. В свою очередь, доза на остеогенные клетки считается равной дозе в слое костного мозга толщиной в 50 мкм, прилегающий к поверхности кости [3, 4]. Этот слой в публикациях Международной Комиссии по Радиологической защите (МКРЗ) назван «эндостом» [3, 4]. При этом выбор значения в 50 мкм связан не с морфологией кости и прилега-

щего костного мозга, а с ограничениями по разрешению существующих цифровых методов микротомографических изображений, используемых для дозиметрического моделирования микроархитектуры кости. В настоящей работе термин «эндост» используется исключительно в морфофизиологическом контексте.

Проблема формирования доз внутреннего облучения непосредственно в остеогенных и гемопоэтических клетках, а не в условных органах-мишенях, периодически поднимается в научной литературе [5, 6]. Исследования в этой области в большей мере сфокусированы на анализе микрораспределения остеотропных альфа-излучающих радионуклидов с использованием гистологических препаратов кости, которые позволяют рассчитывать/измерять длины треков альфа-частиц. Тем не менее, проблема точной оценки доз в ГСК, неравномерно распределенных в органе мишени, также актуальна и для бета-излучающих радионуклидов. Это связано с тем, что используемые в практике β -излучатели (радиофармпрепараты, содержащие ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{90}Y , ^{18}Re , ^{166}Ho , ^{213}Bi , ^{161}Tb [7]), обладают широким энергетическим спектром. Как следствие, электроны разных энергий поглощаются на

Шарагин Павел Алексеевич

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

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

разном удалении от поверхности кости, воздействуя в разной мере на остеогенные и гемопоэтические клетки, неравномерно распределенные в органе мишени. Именно в контексте совершенствования технологий ядерной медицины возникла проблема оценки микрораспределения доз облучения, формируемых бета-излучателями в костном мозге [7].

Наиболее широко используемые сегодня дозиметрические модели микроархитектуры кости построены с помощью томографии и микротомографии [8–10]. Такие модели основаны на измерениях небольшого числа микро-образцов аутопсийного костного материала, поэтому не обладают доказанной репрезентативностью и достаточным разрешением для учета пространственной неоднородности распределения доз в костном мозге. Другой подход к дозиметрическому моделированию состоит в построении математической модели на основе опубликованных данных по линейным размерам костей и параметрам микроархитектуры, включая трабекулярную толщину, межтрабекулярное расстояние и долю костной ткани [11]. Эта модель разрабатывалась для остеотропных $^{89,90}\text{Sr}$, инкорпорированных в костную ткань, и в качестве мишени рассматривала весь объем красного костного мозга. Используя значительный пул опубликованных данных, можно аналогично создать дозиметрическую модель кости и костного мозга с учетом микрораспределения радионуклидов и клеток-мишеней. Для этого в рамках настоящего исследования будет проведен аналитический обзор литературы по гистоморфометрическим особенностям и геометрии расположения остеогенных клеток, а также по неравномерности распределения клеточных элементов в красном костном мозге. Создание подобной микродозиметрической модели (МДМ) высокого разрешения (0,3–0,5 мкм) позволит выделить и проанализировать основные факторы, влияющие на формирование доз в радиочувствительных клетках при применении радиофармпрепаратов для лечения опухолей различных локализаций.

Цель исследования – провести аналитический обзор современного уровня знаний о гистоморфометрических характеристиках трабекулярной кости и прилегающих участков костного мозга с целью создания анатомо-морфологического базиса для построения микродозиметрической модели для расчетов доз на гемопоэтические стволовые клетки и остеобласты.

Задачи исследования

1. Оценка гистоморфометрических особенностей поверхности трабекулярной кости и геометрии расположения остеогенных клеток — по данным литературы.
2. Оценка неравномерности распределения клеточных элементов в ККМ — по данным литературы.
3. Выбор основных параметров для МДМ кости и ККМ, и определение подходов к моделированию.

Материалы и методы

Исследование включало поиск публикаций, по ключевым словам, в поисковых системах Google, Yandex, а также специализированных системах eLibrary; PubMed; Academia.edu, ScienceDirect. Ключевые слова для поиска: кость, костная ткань, трабекулы, эндост, костный мозг, гемопоэтические стволовые клетки, ниши стволовых клеток, trabecular bone structure, bone surface, osteoid, bone-seeking radionuclide deposition, bone mineralization, endosteal layer, HSC distribution.

В качестве источников информации для анализа принимались научные статьи в рецензируемых журналах, монографии, гистологические атласы. Собирались данные по строению трабекулярной кости и костного мозга, его клеточному составу, функциям клеток и их морфологии. Для анализа толщины поверхностного минерализованного слоя кости рассматривались опубликованные результаты измерений с использованием различных техник: автордиографии, гистоморфометрии. Для анализа клеточного состава и пространственного распределения ГСК и остеогенных клеток в ККМ использовались результаты измерений, проведенные с помощью гистоморфометрии (микроскопия с использованием иммуноферментных меток, различных методов окрашивания и др.). Также собирались количественные данные по пространственному расположению клеток и их размерам. Кроме того, анализировалась информация о существующих дозиметрических моделях кости для оценки доз на ККМ.

Результаты и обсуждение

В современной практике радиационной защиты тканями источниками, в случае оценки доз на ККМ от радионуклидов в трабекулярной кости, являются объем кости и поверхность кости [3, 4]. Остеотропные радионуклиды после поступления откладываются на поверхности костной ткани, после чего поступают в объем трабекул [12]. В этой связи, в случае дозиметрии ККМ от радиофармпрепаратов важно определить геометрию источников и мишеней вблизи поверхности кости.

Организация костных поверхностей и особенности их минерализации хорошо изучены [13–15]. Костная ткань трабекул, между которыми расположен костный мозг, представлена межклеточным веществом, остеocyтами, остеобластами и остеокластами. Межклеточное вещество включает минерализованный костный матрикс, основную составляющую кости и неминерализованный костный матрикс – остеоид, расположенный на поверхности трабекул. Согласно результатам исследований, неорганический материал, включая радионуклиды, осаждается в этом неминерализованном слое. Эти данные подтверждаются автордиографическими исследованиями [16], которые показали, что остеотропные радионуклиды осаждаются в слое толщиной 0,8 мкм, прилежащем к костной поверхности. Согласно результатам других исследований, толщина остеоида может достигать ~ 5 мкм [17, 18].

Снаружи от остеоида расположены остеогенные клетки – остеобласты. Эти клетки продуцируют неминерализованный костный матрикс. Выделяют активные и неактивные остеобласты. Активные остеобласты участвуют в построении костной ткани, имеют кубовидную форму и размер 15–30 мкм. У взрослого человека они обнаруживаются в местах роста и посттравматического восстановления кости. Большинство остеобластов как у детей, так и у взрослых пребывают в неактивном состоянии [19] — это вытянутые клетки, расположенные вдоль трабекулярных поверхностей слоем плотностью 19 клеток/мм² [20] и с толщиной около 1 мкм. Облучение остеобластов приводит к остановке их клеточного цикла, в результате чего уменьшается количество самих остеобластов и их потомков, нарушается обмен кальция в организме [21]. Поэтому остеогенные клетки рассматриваются в качестве мишеней при построении дозиметрических моделей [3, 4, 8].

Другими клетками мишенями в случае поступления остеотропных радионуклидов являются клетки костного мозга, расположенные в пространствах между трабекулами, вблизи от слоя остеобластов. Наиболее важным объектом дозиметрии ККМ являются гемопоэтические стволовые клетки, от которых происходят все клетки крови. Именно с облучением ГСК связывают проявление костномозгового синдрома и увеличение риска развития рака [22]. ГСК различной степени дифференцировки расположены в сети ретикулоцитов и коллагеновых волокон [23]. ГСК включают как недифференцированные клетки, не экспрессирующие поверхностные маркеры, так и функциональные ГСК, дающие начало какой-либо линии клеток крови, экспрессирующие линейно-направленные маркеры клеточной поверхности, т.е. клетки-предшественники [24]. Часть ГСК обладают способностью к долгосрочной репопуляции (LT-ГСК), эти клетки делятся 1 раз в 1-2 месяца и устойчивы к цитотоксическим препаратам. Недифференцированные ГСК человека

– это клетки округлой формы, размером около 6-7 мкм [25]. ГСК находятся в ККМ в гемопоэтических нишах, это пространственные структуры из клеток, поддерживающих самообновление, дифференцировку и гетерогенность ГСК за счёт регуляции факторов микроокружения [26]. Выделяют две функциональные ниши ГСК: эндостальную и васкулярную [27]. Микроокружение, которое обеспечивает жизнедеятельность ГСК эндостальной ниши, включает остеопрогениторные клетки, что определяет локализацию ГСК этой ниши [28]. Для них характерна редкая пролиферация и последующая дифференцировка. Васкулярная ниша включает сосудистые и периваскулярные стромальные клетки, которые секретируют факторы, способствующие делению и дифференцировке ГСК, а также их движению в сторону сосудов [29-31]. Концентрация стволовых клеток падает по мере удаления от поверхности кости [1, 2]. На рисунке 1 представлена упрощённая схема расположения клеток и тканей в составе ККМ.

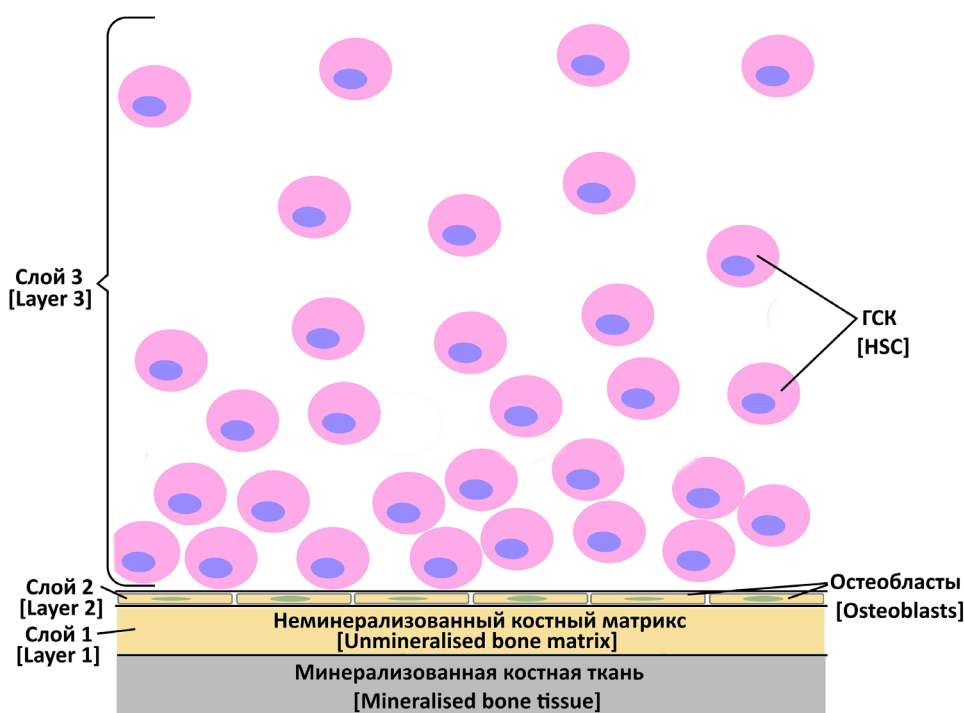


Рис. 1. Схема расположения радиочувствительных клеток относительно поверхности костной трабекулы
[Fig. 1. The scheme of radiosensitive cells arrangement relative to the trabecula bone surface]

На сегодняшний день в литературе имеется ограниченное количество источников, посвященных количественным характеристикам неоднородности пространственного распределения гемопоэтических стволовых клеток. Фактически, все имеющиеся знания об этом базируются на двух оригинальных исследованиях [1, 2]. Описано пространственное распределение ГСК относительно синусов и костных поверхностей на гистологических срезах гребня подвздошной кости толщиной 4 мкм [1]. ГСК были помечены иммуноферментными флуоресцентными метками. Согласно результатам данного исследования, концентрация ГСК в пределах 50 мкм от поверхности трабекул составляет $12,3 \pm 1,98$ ГСК/мм², в этой зоне расположено 20 % ККМ. На расстоянии от 50 до 300 мкм от поверхности трабекулы содержится 64 % ККМ и концентрация клеток в этой зоне равна среднему по ККМ значению

($9,03 \pm 1,47$ клеток/мм²). На больших расстояниях от кости расположены оставшиеся 16 % ККМ. Аналогичные исследования были также проведены для других костей [2]. На рисунке 3 представлены обобщенные данные этих двух исследований [1, 2] в терминах накопительной вероятности обнаружения ГСК от расстояния от костной поверхности. Как следует из Рисунка 3, 75 % ГСК расположены в пределах 300 мкм от костной поверхности. Вариации этого значения для разных костей скелета незначительны.

Согласно [1], большая часть ГСК, которую можно ассоциировать с васкулярной нишей, расположена в пределах 200 мкм от фрагментов сосудов, которые, в свою очередь, расположены рядом с поверхностью кости (в пределах 200 мкм). Таким образом, при дозиметрии остеотропных радионуклидов, нет возможности пространственно разделить эндостальные и васкулярные ГСК.

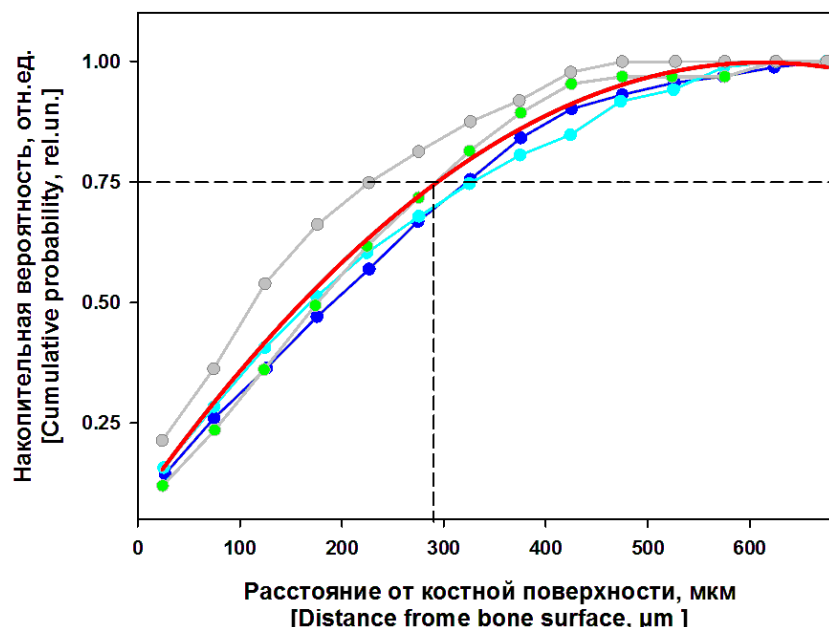


Рис. 2. Пространственное распределение ГСК относительно поверхности кости. Данные представлены для разных костей скелета: — гребень подвздошной кости [1] — рёбра [2] — первый поясничный позвонок [2], — гребень подвздошной кости [2]. Красной линией обозначены усредненные значения

[Fig. 2. Spatial distribution of HSCs relative to the bone surface. The data are presented for different bones of the skeleton: — iliac crest [1] — ribs [2] — first lumbar vertebra [2], — iliac crest [2]. The red line indicates the average values]

Подходы к моделированию и выбор основных параметров для модели

Наиболее подробные дозиметрические модели кости с учетом пространственного положения ГСК, остеогенных и жировых клеток были созданы для альфа-излучающих радионуклидов [32, 33]. В одной из таких моделей [32] костномозговая полость представлена сферой, внутри которой расположены остеопрогениторные и гемопоэтические клетки сферической формы одинакового размера. Положение остеопрогениторных клеток принималось согласно МКРЗ 110 [4] — они располагались равномерно в слое 50 мкм от костной поверхности. Таким образом, модель является весьма упрощенной.

В опубликованной модели шейного позвонка [34], учитывается пространственное распределение ГСК относительно сосудов. Модель представляет собой бесконечный объем, трабекулярная кость моделировалась как регулярная сеть из прямых трабекул с толщиной 50 мкм, в промежутках между которыми расположены по 25 сосудов радиусом 20 мкм. Тканью мишенью выбран слой ГСК, расположенных в 10 мкм от сосудов, в качестве тканей-источников рассматривались: содержимое сосудов, ККМ и костные трабекулы. Модель предназначена для оценки доз от различных радионуклидов, включая бета-излучающие ^{137}Cs , ^{131}I , ^{90}Sr .

В реальности трабекулярная кость представляет собой трехмерную сеть костных балок или тяжей — трабекул [35]. Их форма может быть вытянутой, такой тип трабекул называют стержневидной, либо уплощенной — пластинчатый тип [35]. Процентное соотношение пластинок и стержней зависит от типа кости и возраста индивида. Например, в позвон-

ках взрослых людей 83 % от объема трабекул занимают пластинки, а в шейке бедренной кости на них приходится 90 % от объема [36]. С возрастом пластинки в составе трабекулярной кости истончаются и перфорируются, их число уменьшается [37].

Размеры трабекул и пространств между ними могут существенно отличаться для разных костей скелета, а также они могут существенно варьировать внутри одной кости [38]. Также размеры трабекул и межтрабекулярных пространств существенно изменяются с возрастом. Так, у взрослого человека межтрабекулярное расстояние в гленоиде лопатки составляет 0,96 мм, а в плечевой кости 2,37 мм, у новорожденного данная величина была равна 0,48 и 0,36 мм, соответственно [38].

Построение цифровой модели трабекулярной кости с учетом микрораспределения источников и мишеней является нетривиальной задачей. Для этого необходимо оценить допустимый уровень упрощений формы трабекул, что будет предметом дальнейших исследований. После этого будет разработана геометрическая модель микроархитектуры кости, где за основу будет взят ранее разработанный стохастический параметрический подход [11].

Для того чтобы оценить допустимый уровень упрощения формы трабекул, на основе результатов представленного анализа литературы будет построена упрощенная цифровая модель. В первом приближении она будет представлять собой несколько слоев имитирующих клетки-мишени и источник излучения. В качестве источника принимается слой остеоида (слой-источник), расположенный между минерализованным матриксом и остеогенными клетками. Толщина

этого слоя варьирует в пределах 1-5 мкм. Ткани мишени будут представлять собой четыре слоя, расположенные параллельно поверхности трабекулы. Первый слой (Слой 1) – прилегает к поверхности кости и представлен остеобластами, выстилающими костные поверхности, его толщина равна толщине этих клеток (условное название – остеогенный слой). Последующие слои располагаются снаружи от остеогенного слоя и включают ГСК. Слой 3, представленный на рисунке 1, разбит на 4 слоя: ГСК-1, ГСК-2, ГСК-3, ГСК-4. Каждый из этих слоёв включает по 25 % ГСК, однако толщина слоёв увеличивается по мере удаления от поверхности кости. Таким образом, концентрация ГСК снижается в зависимости от расстояния от остеогенного слоя в соответствии с данными литературы [1, 2]. В Таблице обобщены результаты доступных литературных данных и представлены численные значения основных параметров, которые будут использованы для моделирования.

Таблица. Диапазоны толщин слоёв моделируемых структур [1, 2, 19, 20, 25, 27, 28]

[Table. Ranges of layer thicknesses of the simulated structures [1, 2, 19, 20, 25, 27, 28]]

Моделируемая структура [Modeling structure]	Толщина слоя, мкм [Layer thickness, μm]
Слой-источник [Source layer]	1-5
Слои-мишени [Target layers]	
Слой-1 [1st layer]	1
* ГСК-1 [HSC-1]	35-80
* ГСК-2 [HSC-2]	78-117
* ГСК-3 [HSC-3]	111-129
* ГСК-4 [HSC-4]	324-450

* - каждый слой включает 25 % ГСК [each layer includes 25 % HSC]

Параметры, представленные в таблице, будут использованы в дальнейших исследованиях для построения упрощённых моделей фрагментов трабекулярной кости в различных приближениях, с целью оценки необходимости учета расположения радиочувствительных клеток. При реализации модели будет предусмотрена возможность менять параметры, что полезно как при их уточнении как в связи с появляющимися новыми экспериментальными данными, так и для анализа чувствительности и неопределённости модельных предсказаний.

Заключение

В настоящее время морфологические особенности минерализации кости и размеры соответствующих структур хорошо изучены. В результате работы были определены гистоморфометрические особенности поверхности трабекулярной кости. Собранные и проанализированные данные по строению трабекул и процессу их минерализации. Эти данные, позволяют оценить положение и геометрию тканей-источников облучения. Также было оценено положение и геометрия остеогенных клеток, которые могут рассматриваться как клетки-мишени.

Собраны и проанализированы современные данные по морфологии костного мозга и клеток в его составе. Обнаружено только 2 оригинальных исследования пространственного распределения гемопоэтических стволовых клеток в костном мозге, согласно которым большая часть ГСК расположена в пределах 200 мкм от поверхности трабекул. ГСК эндостальной и васкулярной ниш геометрически расположены преимущественно вблизи костных поверхностей. С точки зрения дозообразования они принципиально не различаются и будут рассматриваться совместно при дозиметрическом моделировании. Ткани-источники и мишени будут моделироваться послойно, включая слой-источник и слои мишени, имитирующие остеогенные клетки и ГСК на различном удалении от поверхности трабекулы. Модель позволит рассчитывать дозы на ГСК и остеобласты при накоплении на поверхности кости бета-излучающих радионуклидов.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Шарагин П.А. – анализ литературы, редактирование статьи; написание статьи.

Ахмадуллин Р.М. – анализ литературы, редактирование статьи

Шишкина Е.А. – разработка концепции, дизайн исследования.

Толстых Е.И. – разработка концепции, редактирование статьи.

Благодарности

Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить качество рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда по мероприятию «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс), Соглашение № 25-25-20092 поддерживаемого Регионом – программа Челябинской области «Развитие науки в Челябинской области», грант в форме субсидии, Соглашение № 30-2025-003346.

Литература

1. Watchman C.J., Bourke V.A., Lyon J.R. et al. Spatial distribution of blood vessels and CD34+ hematopoietic stem and progenitor cells within the marrow cavities of human cancellous bone // Journal of Nuclear Medicine. 2007. Vol. 48, No 4. P. 645-654. DOI: 10.2967/jnumed.106.035337.
2. Bourke V.A., Watchman C.J., Reith J.D. et al. Spatial gradients of blood vessels and hematopoietic stem and progenitor cells within the marrow cavities of the human skeleton // Blood. 2009. Vol. 114, No 19. P. 4077-4080. DOI: 10.1182/blood-2008-12-192922.
3. Zankl M., Eakins J., Ros J-MG. et al. The ICRP recommended methods of red bone marrow dosimetry // Radiation measurements. 2021. Vol. 146. P. 106611. DOI: 10.1016/j.radmeas.2021.
4. ICRP. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110 // Annals of the ICRP. 2009. Vol. 39, No 2.
5. Belley M.D., Ashcraft K.A., Lee C.T. et al. Microdosimetric and Biological Effects of Photon Irradiation at Different

- Energies in Bone Marrow // Radiation Research. 2015. Vol. 184, No 4. P. 378-391. DOI: 10.1667/RR14095.1.
6. Tabatadze G., Miller B.W., Tolmachev S.Y. Mapping ²⁴¹Am Spatial Distribution Within Anatomical Bone Structures Using Digital Autoradiography // Health Physics. 2019. Vol. 117, No 2. P. 179-186. DOI:10.1097/HP.0000000000000947.
 7. Hemmingsson J., Svensson J., van der Meulen N.P. et al. Active bone marrow S-values for the low-energy electron emitter terbium-161 compared to S-values for lutetium-177 and yttrium-90 // EJNMMI Physics. 2022. Vol. 9, No 1. P. 65. DOI:10.1186/s40658-022-00495-7.
 8. Shah A.P., Bolch W.E., Rajon D.A. et al. A paired-image radiation transport model for skeletal dosimetry // Journal of Nuclear Medicine. 2005. No 46. P. 344-353.
 9. Xu X.G., Chao T.C., Bozkurt A. VIP-Man: an image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the Visible Human Project for multi-particle Monte Carlo calculations // Health Physics. 2000. Vol. 78, No 5. P. 476-486. DOI: 10.1097/00004032-200005000-00003.
 10. Alghamdi A.A.A. The Implementation and Application of a Saudi Voxel-Based Anthropomorphic Phantom in OpenMC for Radiological Imaging and Dosimetry // Diagnostics (Basel). 2025. Vol. 15, No 14. P. 1764. DOI: 10.3390/diagnostics15141764.
 11. Degteva M.O., Tolstykh E.I., Shishkina E.A. et al. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: General approach and application to active marrow exposure from bone-seeking beta-particle emitters // PLoS One. 2021. Vol. 16, No 10. P. e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605.
 12. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O. et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, No 1. P. 87-127.
 13. Greenawalt J.W., Rossi C.S., Lehninger A.L. Effect of active accumulation of calcium and phosphate ions on the structure of rat liver mitochondria // Journal of Cell Biology. 1964. Vol. 23, No 1. P. 21-38.
 14. Boonrungsiman S., Gentleman E., Carzaniga R. et al. The role of intracellular calcium phosphate in osteoblast-mediated bone apatite formation // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2012. Vol. 109, No 35. P. 1470-1475.
 15. Pei D.D., Sun J.L., Zhu C.H. et al. Contribution of mitophagy to cell-mediated mineralization: revisiting a 50-year-old conundrum // Advanced science (Weinheim, Baden-Wuerttemberg, Germany). 2018. Vol. 5, No 10. P. 1800873.
 16. Riggs B.L., Marshall J.H., Jowsey J. et al. Quantitative ⁴⁵Ca autoradiography of human bone // The Journal of laboratory and clinical medicine. 1971. No 78. P. 585-598.
 17. Любашевский Н.М. Метаболизм радиоизотопов в скелете позвоночных. М.: Наука, 1980. 255 с.
 18. Lyovkina Y.V., Miller S.C., Romanov S.A. et al. Quantitative plutonium microdistribution in bone tissue of vertebra from a Mayak worker // Health Physics. Vol. 99, No 4. P. 464-470. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181cb840f.
 19. Miller S.C., de Saint-Georges L., Bowman B.M. et al. Bone lining cells: structure and function // Scanning Microscopy. 1989. Vol. 3, No 3. P. 953-960.
 20. Jee W.S.S. The skeletal tissues, in Cell and Tissue Biology. A Textbook of Histology, ed. Weiss L. Urban and Schwarzenberg: Baltimore, 1988, chap. 7.
 21. Shupp A.B., Kolb A.D., Mukhopadhyay D. et al. Cancer Metastases to Bone: Concepts, Mechanisms, and Interactions with Bone Osteoblasts // Cancers. 2018. Vol. 10, No 6. P. 182. DOI: 10.3390/cancers10060182.
 22. Down J., Van Os R., Ploemacher R. Radiation sensitivity and repair of long-term repopulating bone marrow stem cells // Experimental Hematology. 1991. Vol. 19. P. 474.
 23. Bianco P., Gehron Robey P. Marrow stromal stem cells // The Journal of clinical investigation. 2000. Vol. 105, No 12. P. 1663-1668. DOI: 10.1172/JCI10413.
 24. Parmar K., Mauch P., Vergilio J.A. et al. Distribution of hematopoietic stem cells in the bone marrow according to regional hypoxia // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2007. Vol. 104, No 13. P. 5431-5436. DOI: 10.1073/pnas.0701152104.
 25. Berardi A.C., Wang A., Levine J.D. et al. Functional isolation and characterization of human hematopoietic stem cells // Science. 1995. Vol. 267, No 5194. P. 104-108. DOI: 10.1126/science.7528940.
 26. Wei Q., Frenette P.S. Niches for Hematopoietic Stem Cells and Their Progeny // Immunity. 2018. Vol. 48, No 4. P. 632-648. DOI: 10.1016/j.immuni.2018.03.024.
 27. Kwon M., Kim B.S., Yoon S. et al. Hematopoietic Stem Cells and Their Niche in Bone Marrow // International Journal of Molecular Science. 2024. Vol. 25, No 13. P. 6837. DOI: 10.3390/ijms25136837.
 28. Lévesque J.P., Helwani F.M., Winkler I.G. The endosteal 'osteoblastic' niche and its role in hematopoietic stem cell homing and mobilization // Leukemia. 2010. Vol. 24, No 12. P. 1979-1992. DOI: 10.1038/leu.2010.214.
 29. Ramasamy S.K., Kusumbe A.P., Schiller M. et al. Blood flow controls bone vascular function and osteogenesis // Nature Communications. 2016. Vol. 7, No 1. P. 1-13.
 30. He N., Zhang L., Cui J. et al. Bone marrow vascular niche: home for hematopoietic stem cells // Bone Marrow Research. 2014. Vol. 2014. P. 128. DOI: 10.1155/2014/128436.
 31. Georgescu A., Oved J.H., Galarraga J.H. et al. Self-organization of the hematopoietic vascular niche and emergent innate immunity on a chip // Cell Stem Cell. 2024. Vol. 31, No 12. P. 1847-1864.e6. DOI: 10.1016/j.stem.2024.11.003.
 32. Hobbs R.F., Song H., Watchman C.J. et al. A bone marrow toxicity model for ²²³Ra alpha-emitter radiopharmaceutical therapy // Physics in Medicine and Biology. 2012. Vol. 57, No 10. P. 3207-3022. DOI: 10.1088/0031-9155/57/10/3207.
 33. Tranel J., Feng F.Y., St. James S. et al. Effect of microdistribution of alpha and beta-emitters in targeted radionuclide therapies on delivered absorbed dose in a GATE model of bone marrow // Physics in Medicine and Biology. 2021. Vol. 66, No 3. P. 035016.
 34. Kobayashi N. Monte Carlo Dose Estimation of Absorbed Dose to the Hematopoietic Stem Cell Layer of the Bone Marrow Assuming Nonuniform Distribution Around the Vascular Endothelium of the Bone Marrow: Simulation and Analysis Study // JMIRx Med. 2025. Vol. 6. P. e68029. DOI: 10.2196/68029.
 35. Oftadeh R., Perez-Viloria M., Villa-Camacho J.C. et al. Biomechanics and mechanobiology of trabecular bone // Journal of Biomechanical Engineering. 2015. Vol. 137, No 1. P. 0108021-01080215. DOI: 10.1115/1.4029176.
 36. Liu X.S., Sajda P., Saha P.K. et al. Complete volumetric decomposition of individual trabecular plates and rods and its morphological correlations with anisotropic elastic moduli in human trabecular bone // Journal Bone Mineral Research. 2008. Vol. 23, No 2. P. 223-235. DOI: 10.1359/jbmr.071009.
 37. van Ruijven L.J., Giesen E.B., Mulder L. et al. The effect of bone loss on rod-like and plate-like trabeculae in the cancellous bone of the mandibular condyle // Bone. 2005. Vol. 36, No 6. P. 1078-1085. DOI: 10.1016/j.bone.2005.02.018.
 38. Tolstykh E.I., Sharagin P.A., Shishkina E.A. et al. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: Anatomical-morphological basis and parameter evaluation // PLoS One. 2025. Vol. 20, No 7. P. e0327156. DOI: 10.1371/journal.pone.0327156.

Поступила: 05.11.2025

Шарагин Павел Алексеевич – магистр биологических наук, научный сотрудник лаборатории цифровых и вычислительных методов дозиметрии Южно-Уральского Федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства; ассистент кафедры радиобиологии Челябинского государственного университета. **Адрес для переписки:** 454141, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: sharagin@urcrm.ru; ORCID: 0000-0002-1457-4916

Ахмадуллин Роман Марселевич – старший инженер-исследователь лаборатории цифровых и вычислительных методов дозиметрии Южно-Уральского Федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия; ORCID: 0009-0004-9488-9599

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, заведующая лабораторией цифровых и вычислительных методов дозиметрии, ведущий научный сотрудник Южно-Уральского Федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия; ORCID: 0000-0002-4958-3214

Шишкина Елена Анатольевна – ведущий научный сотрудник, доктор биологических наук, директор Научно-исследовательского института радиологической защиты в составе Южно-Уральского Федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства; Доцент кафедры радиобиологии Челябинского государственного университета, Челябинск, Россия; ORCID: 0000-0003-4464-0889

Для цитирования: Шарагин П.А., Ахмадуллин Р.М., Толстых Е.И., Шишкина Е.А. Определение морфометрических характеристик костного мозга и кости с целью создания дозиметрической модели высокого разрешения // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 75–83. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-75-83

Determination of morphometric characteristics of bone marrow and bone in order to create a high-resolution dosimetric model

Pavel A. Sharagin^{1,2}, Roman M. Akhmadullin¹, Evgenia I. Tolstykh¹, Elena A. Shishkina^{1,2}

¹ Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Osteogenic and hematopoietic stem cells can be exposed to radiation during cancer radiotherapy with radiopharmaceuticals due to adsorption of radionuclides into bones. Calculation of doses to normal radiosensitive cells is important for assessing the benefit/harm ratio. Therefore, the creation of a dosimetric model of bone and bone marrow, which takes into account the microdistribution of radionuclides and target cells, is an important task. Objective: an analytical review of the current state of knowledge about the histomorphometric characteristics of the trabecular bone and adjacent areas of the bone marrow in order to create an anatomical and morphological basis for constructing a microdosimetric model for calculating doses to hematopoietic stem cells and osteoblasts. Materials and Methods: A search was conducted for published data on the structure and mineralization of bone tissue in the trabecular bone, the cellular composition of the bone marrow, the morphology and location of cells in its volume relative to the bone surface. Results and Discussion: Currently, the morphophysiological features of bone mineralization and the size of the corresponding structures are well studied. The surface of the trabeculae is covered with a layer of unmineralized bone matrix 1-5 microns thick, which is capable of rapidly adsorbing radionuclides. An adjacent layer of osteoblasts is about 1 micrometer thick. Data on the distribution of stem cells in the bone marrow volume is very limited. It is known that most of the stem cells are located within 200 micrometers from the surface of the trabeculae. The cell size is about 6-7 micrometers. Conclusion: Based on the existing knowledge about the structure of bone and the distribution of osteogenic and hematopoietic stem cells in the bone marrow, it is planned to create a model consisting of the number of layers, including a source layer and target layers, describing osteogenic cells and hematopoietic stem cells at different distances from the bone.

Key words: hematopoietic stem cells, osteoblasts, trabecular bone, dosimetry, radiopharmaceuticals.

Pavel A. Sharagin

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

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

Authors' personal contribution

Pavel A. Sharagin – published data analysis, article writing.

Roman M. Akhmadullin – published data analysis, article editing.

Evgenia I. Tolstykh – concept development, article editing.

Elena A. Shishkina – concept development, research design.

Acknowledgments

The authors are grateful to the reviewers for their constructive comments, which made it possible to improve the quality of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation for the event "Conducting basic scientific research and exploratory scientific research by small individual scientific groups" (regional competition) Agreement No. 25-25-20092 supported by the Region - Chelyabinsk Region program "Development of Science in the Chelyabinsk Region", grant in the form of a subsidy Agreement No. 30-2025-003346.

References

1. Watchman CJ, Bourke VA, Lyon JR, Knowlton AE, Butler SL, Grier DD, et al. Spatial distribution of blood vessels and CD34+ hematopoietic stem and progenitor cells within the marrow cavities of human cancellous bone. *Journal of Nuclear Medicine*. 2007;48(4): 645-654. DOI: 10.2967/jnumed.106.035337.
2. Bourke VA, Watchman CJ, Reith JD, Jorgensen ML, Dieudonné A, Bolch WE. Spatial gradients of blood vessels and hematopoietic stem and progenitor cells within the marrow cavities of the human skeleton. *Blood*. 2009;114(19): 4077-4080. DOI: 10.1182/blood-2008-12-192922.
3. Zankl M, Eakins J, Ros J-MG, Huet C. The ICRP recommended methods of red bone marrow dosimetry. *Radiation measurements*. 2021;146: 106611. DOI: 10.1016/j.radmeas.2021.106611.
4. ICRP. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. *Annals of the ICRP*. 2009;39(2).
5. Belley MD, Ashcraft KA, Lee CT, Cornwall-Brady MR, Chen JJ, Gunasingha R, et al. Microdosimetric and Biological Effects of Photon Irradiation at Different Energies in Bone Marrow. *Radiation Research*. 2015;184(4): 378-391. DOI: 10.1667/RR14095.
6. Tabatadze G, Miller BW, Tolmachev SY. Mapping ^{241}Am Spatial Distribution Within Anatomical Bone Structures Using Digital Autoradiography. *Health Physics*. 2019;117(2): 179-186. DOI:10.1097/HP.0000000000000947.
7. Hemmingsson J, Svensson J, van der Meulen NP, Müller C, Bernhardt P. Active bone marrow S-values for the low-energy electron emitter terbium-161 compared to S-values for lutetium-177 and yttrium-90. *EJNMMI Physics*. 2022;9(1): 65. Published 2022 Sep 24. DOI:10.1186/s40658-022-00495-7.
8. Shah AP, Bolch WE, Rajon DA, Patton PW, Jokisch DW. A paired-image radiation transport model for skeletal dosimetry. *Journal of Nuclear Medicine*. 2005; 46: 344–353.
9. Xu XG, Chao TC, Bozkurt A. VIP-Man: an image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the Visible Human Project for multi-particle Monte Carlo calculations. *Health Physics*. 2000;78(5): 476-486. DOI: 10.1097/00004032-200005000-00003.
10. Alghamdi AAA. The Implementation and Application of a Saudi Voxel-Based Anthropomorphic Phantom in OpenMC for Radiological Imaging and Dosimetry. *Diagnostics (Basel)*. 2025;15(14): 1764. DOI: 10.3390/diagnostics15141764.
11. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AY, et al. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: General approach and application to active marrow exposure from bone-seeking beta-particle emitters. *PLoS One*. 2021;16(10): e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605.
12. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(1): 87-127. DOI: 10.1088/0952-4746/35/1/87.
13. Greenawalt JW, Rossi CS, Lehninger AL. Effect of active accumulation of calcium and phosphate ions on the structure of rat liver mitochondria. *Journal of Cell Biology*. 1964;23(1): 21–38.
14. Boonrungsiman S, Gentleman E, Carzaniga R, Evans ND, McComb DW, Porter AE, et al. The role of intracellular calcium phosphate in osteoblast-mediated bone apatite formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012;109(35): 14170-14175. DOI:10.1073/pnas.1208916109.
15. Pei DD, Sun JL, Zhu CH, Tian FC, Jiao K, Anderson MR, et al. Contribution of Mitophagy to Cell-Mediated Mineralization: Revisiting a 50-Year-Old Conundrum. *Advanced science (Weinheim, Baden-Württemberg, Germany)*. 2018;5(10): 1800873. Published 2018 Jul 29. DOI:10.1002/advs.201800873.
16. Riggs BL, Marshall JH, Jowsey J, Heaney RP, Bassingthwaite JB. Quantitative ^{45}Ca autoradiography of human bone. *The Journal of laboratory and clinical medicine*. 1971;78: 585–598.
17. Lyubashevsky NM. Metabolism of radioisotopes in skeleton of vertebrates. Moscow. *Nauka = Science*. 1980: 255 p. (In Russian).
18. Lyovkina YV, Miller SC, Romanov SA, Krahenbuhl MP, Belosokhov MV. Quantitative plutonium microdistribution in bone tissue of vertebra from a Mayak worker. *Health Physics*. 2010;99(4): 464-470. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181cb840f.
19. Miller SC, de Saint-Georges L, Bowman BM, Jee WS. Bone lining cells: structure and function. *Scanning Microscopy*. 1989;3(3): 953-960 p.
20. Jee WSS. Structure and function of bone tissue, in Orthopaedics, Principles of Basic and Clinical Science. Ed. Bronner F and Worrell RV. CRC Press, Boca Raton: FL; 1999. chap. 1.
21. Shupp AB, Kolb AD, Mukhopadhyay D, Bussard KM. Cancer Metastases to Bone: Concepts, Mechanisms, and Interactions with Bone Osteoblasts. *Cancers (Basel)*. 2018;10(6): 182. Published 2018 Jun 4. DOI:10.3390/cancers10060182.
22. Down JD, Boudewijn A, van Os R, Thames HD, Ploemacher RE. Variations in radiation sensitivity and repair among different hematopoietic stem cell subsets following fractionated irradiation. *Blood*. 1995;86(1): 122-127.
23. Bianco P, Gehron Robey P. Marrow stromal stem cells. *The Journal of clinical investigation*. 2000;105(12): 1663-1668. DOI: 10.1172/JCI10413.
24. Parmar K, Mauch P, Vergilio JA, Sackstein R, Down JD. Distribution of hematopoietic stem cells in the bone marrow according to regional hypoxia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007;104(13): 5431-5436. DOI: 10.1073/pnas.0701152104.
25. Berardi AC, Wang A, Levine JD, Lopez P, Scadden DT. Functional isolation and characterization of human hematopoietic stem cells. *Science*. 1995;267(5194): 104-8. DOI: 10.1126/science.7528940.
26. Wei Q, Frenette PS. Niches for Hematopoietic Stem Cells and Their Progeny. *Immunity*. 2018;48(4): 632-648. DOI: 10.1016/j.immuni.2018.03.024.

27. Kwon M, Kim BS, Yoon S, Oh SO, Lee D. Hematopoietic Stem Cells and Their Niche in Bone Marrow. *International Journal of Molecular Science*. 2024;25(13): 6837. DOI: 10.3390/ijms25136837.
28. Lévesque JP, Helwani FM, Winkler IG. The endosteal 'osteoblastic' niche and its role in hematopoietic stem cell homing and mobilization. *Leukemia*. 2010;24(12): 1979-1992. DOI: 10.1038/leu.2010.214.
29. Ramasamy SK, Kusumbe AP, Schiller. Blood flow controls bone vascular function and osteogenesis. *Nature Communications*. 2016;7(1): 1–13.
30. He N, Zhang L, Cui J, Li Z. Bone marrow vascular niche: home for hematopoietic stem cells. *Bone Marrow Research*. 2014;2014: 128-436. DOI: 10.1155/2014/128436.
31. Georgescu A, Oved JH, Galarraga JH, Cantrell T, Mehta S, Dulmovits BM, et al. Self-organization of the hematopoietic vascular niche and emergent innate immunity on a chip. *Cell Stem Cell*. 2024;31(12): 1847-1864.e6. DOI: 10.1016/j.stem.2024.11.003.
32. Hobbs RF, Song H, Watchman CJ, Bolch WE, Aksnes AK, Ramdahl T, et al. A bone marrow toxicity model for ²²³Ra alpha-emitter radiopharmaceutical therapy. *Physics in Medicine and Biology*. 2012;57(10): 3207-3222. DOI: 10.1088/0031-9155/57/10/3207.
33. Tranel J, Feng FY, St. James S, Hope TA. Effect of microdistribution of alpha and beta-emitters in targeted radionuclide therapies on delivered absorbed dose in a GATE model of bone marrow. *Physics in Medicine and Biology*. 2021;66(3): 035016.
34. Kobayashi N. Monte Carlo Dose Estimation of Absorbed Dose to the Hematopoietic Stem Cell Layer of the Bone Marrow Assuming Nonuniform Distribution Around the Vascular Endothelium of the Bone Marrow: Simulation and Analysis Study. *JMIRx Med*. 2025;6: e68029. DOI: 10.2196/68029.
35. Oftadeh R, Perez-Viloria M, Villa-Camacho JC, Vaziri A, Nazarian A. Biomechanics and mechanobiology of trabecular bone: a review. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2015;137(1): 0108021–01080215. DOI: 10.1115/1.4029176.
36. Liu XS, Sajda P, Saha PK, Wehrli FW, Bevil G, Keaveny TM, et al. Complete volumetric decomposition of individual trabecular plates and rods and its morphological correlations with anisotropic elastic moduli in human trabecular bone. *Journal Bone Mineral Research*. 2008;23(2): 223-235. DOI: 10.1359/jbmr.071009.
37. van Ruijven LJ, Giesen EB, Mulder L, Farella M, van Eijden TM. The effect of bone loss on rod-like and plate-like trabeculae in the cancellous bone of the mandibular condyle. *Bone*. 2005;36(6): 1078-1085. DOI: 10.1016/j.bone.2005.02.018.
38. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Volchkova AY, Smith MA, Napier BA. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: Anatomical-morphological basis and parameter evaluation. *PLoS One*. 2025;20(7): e0327156. DOI: 10.1371/journal.pone.0327156.

Received: November 05, 2025

For correspondence: Pavel A. Sharagin – Master of Biological Sciences, Researcher of the R&D Laboratory of Digital and Computational Dosimetry Methods, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency; Assistant of the Department of Radiobiology of Chelyabinsk State University (68A, Vorovsky Str., Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: sharagin@urcrm.ru); ORCID: 0000-0002-1457-4916

Roman M. Akhmadullin – Senior Research Engineer of the R&D Laboratory of Digital and Computational Dosimetry Methods, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia; ORCID: 0009-0004-9488-9599

Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Sciences, Head of the R&D Laboratory of Digital and Computational Dosimetry Methods, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia; ORCID: 0000-0002-4958-3214

Elena A. Shishkina – Doctor of Biological Sciences, Director at the Research Institute of Radiological Protection, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency; Associate Professor of the Department of Radiobiology of Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia; ORCID: 0000-0003-4464-0889

For citation: Sharagin P.A., Akhmadullin R.M., Tolstykh E.I., Shishkina E.A. Determination of morphometric characteristics of bone marrow and bone in order to create a high-resolution dosimetric model. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 75–83. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-75-83

Радиоэкологические аспекты управления хвостохранилищами урановой промышленности Таджикистана

Мирсаидов У.¹, Назаров Х.М.², Мирсаидзода И.¹, Саидзода В.Я.¹, Азизов О.А.¹

¹ Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности
Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

² Филиал Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности
Национальной академии наук Таджикистана в Согдийской области, Бустон, Таджикистан

Люди и окружающая среда в настоящее время и в будущем должны быть защищены от радиационных рисков. В связи с этим целью данной работы стало обобщение существующих данных о хвостохранилищах урановой промышленности Таджикистана и разработка научно обоснованных радиационно-гигиенических подходов к обращению с низкоактивными радиоактивными отходами. Задачей исследования являлся анализ формирования радиоактивных хвостохранилищ на территории Таджикистана. Материалы и методы: Информационной базой исследования послужили результаты ранее выполненных научных работ. Рассмотрены основные характеристики хвостохранилищ, а также показатели их радиационного воздействия на окружающую среду. Особое внимание уделено вопросам категоризации и паспортизации радиоактивных отходов. Радиационный мониторинг осуществлялся с использованием современных измерительных приборов и оборудования производства Российской Федерации («Доза»), Республики Беларусь («Атомтех»), США («Canberra») и Германии («Thermo»). Результаты исследования и обсуждение: Выявлены существующие радиоэкологические риски в зонах расположения незаконсервированных хвостохранилищ. Рассмотрены радиационно-гигиенические требования к обеспечению радиационной безопасности промышленных отходов. Отмечено, что проведенные рекультивационные работы на объектах г. Истиклола имеют существенную практическую значимость, поскольку обеспечили снижение радиационного фона до нормативного уровня (0,3 мкЗв/ч), уменьшили техногенную нагрузку на окружающую среду и повысили экологическую безопасность населения. Заключение: Перспективными направлениями являются продолжение рекультивации проблемных участков, включая хвостохранилище цеха № 3 бывшего гидрометаллургического завода, реализация проекта по восстановлению Дигмайского хвостохранилища с демонтажем загрязнённой инфраструктуры, принятие мер по обеспечению безопасности Адрасманского хвостохранилища, а также внедрение государственной программы безопасного управления урановым наследием с системой долгосрочного радиоэкологического мониторинга. Комплексная реализация указанных мероприятий обеспечит дальнейшее снижение радиационных и экологических рисков, создаст основу для безопасного и устойчивого развития территории, а также позволит обеспечить её безопасное дальнейшее использование.

Ключевые слова: урановая промышленность, хвостохранилища, радионуклиды, радиоэкология, радиационный риск, Таджикистан, радиационная безопасность, рекультивация.

Введение

Переработка урана сопряжена с образованием радиоактивных отходов, которые требуют безопасного хранения в течение долгих лет. Образование радиоактивных отходов на территории Таджикистана произошло во второй половине XX века. На сегодняшний день объем отходов, образовавшихся в результате добычи и переработки урановых руд, оценивается примерно в 55 млн тонн и размещен в 10 хвостохранилищах общей площадью порядка 170 га. Практически все ключевые объекты уранового наследия локализованы в Согдийской области Таджикистана, в горной местности, в непосредственной близости от населенных пунктов Истиклол, Гафуров, Худжанд, Бустон и Адрасман [1–4].

Наиболее крупные и экологически значимые объекты сосредоточены в районах г. Истиклола и Дигмайского хвостохранилища, содержащего десятки миллионов тонн отходов уранового производства. Несмотря на проведение отдельных рекультивационных мероприятий в последние

годы, включая снижение уровней гамма-излучения до фоновых значений на ряде объектов, проблема радиационного наследия остается актуальной и требует долгосрочного мониторинга и комплексных защитных мер.

Следует отметить, что в настоящее время объем доступной информации, касающейся категоризации и паспортизации радиоактивных отходов уранового производства, является недостаточным. Сложившаяся ситуация требовала всестороннего изучения и анализа.

Цель исследования – обобщение имеющихся данных, связанных с хвостохранилищами урановой промышленности Таджикистана, и обоснование радиационно-гигиенических подходов к обращению с низкоактивными отходами.

Объекты исследования – хвостохранилища урановой промышленности Таджикистана.

Предмет исследования – радиоэкологические процессы, миграция радионуклидов, паспортизации, методы управления и мониторинга.

Назаров Холмурод Марипович

Филиал Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности в Согдийской области

Адрес для переписки: 735730, Таджикистан, г. Бустон, ул. Б. Гафурова, 1А; E-mail: holmurod18@mail.ru

История формирования радиоактивных хвостохранилищ на территории Таджикистана

С началом промышленной переработки урановых руд на территории Таджикистана стало формироваться значительное количество хвостохранилищ радиоактивных отходов. В 1945-1949 гг. ураноперерабатывающие предприятия были введены в эксплуатацию в Табашаре (ныне г. Истиклол), Адрасмане, Бободжон Гафуровском районе, а также в г. Чкаловске (ныне г. Бустон), где располагался крупнейший завод [5, 6].

В поселке Адрасман в период с 1941 по 1957 год до остановки гидрометаллургического завода (ГМЗ) было создано шесть хвостохранилищ, каждое из которых содержало от 60 до 100 тыс. тонн отходов. В конце 1970-х годов они были объединены в единое хвостохранилище № 2 площадью около 2,5 га с суммарным объемом отходов порядка 400 тыс. тонн [7].

Гафуровское хвостохранилище эксплуатировалось в 1942-1955 гг., занимает около 5 га и содержит аналогичный объем отходов [4].

Хвостохранилище «Карты 1-9», включающее девять карт, сформировано на площади 18 га и аккумулирует около 4 млн тонн радиоактивных отходов [4].

Значительные объемы радиоактивных отходов сосредоточены в пределах г. Истиклола, где в результате деятельности горнодобывающих и перерабатывающих предприятий размещены отвалы горных пород, площадки кучного выщелачивания, отвала «Фабрики бедных руд», хвостохранилища и остатки промышленных сооружений. Со-

вокупная площадь хвостохранилищ и отвалов забалансовых руд в данном районе составляет около 63 га. Подробное описание истории формирования радиоактивного загрязнения промплощадки «Табашар» приведено в работах [8, 9].

Крупнейшим объектом накопления радиоактивных отходов является Дигмайское хвостохранилище, введенное в эксплуатацию в 1963 г. Оно занимает площадь около 90 га и содержит порядка 20 млн тонн отходов урановых руд, около 500 тыс. тонн забалансовой урановой руды, а также 5,7 млн тонн отходов переработки ванадийсодержащего сырья с суммарной активностью 156 ТБк. Хвостохранилище заполнено примерно на 83 % проектной емкости и в настоящее время остается действующим [10].

В работе Рахматова Н.Н. отмечается, что дополнительными источниками радиационного воздействия являются отвалы и дренаж шахтных вод в окрестностях г. Худжанда. Отвалы штолен бывшего Рудника № 3 расположены примерно в 2 км от жилой застройки города на склонах предгорья горы Моголтау. Шахты эксплуатировались в период 1976-1985 гг., а общая площадь отвалов составляет около 6 га [11].

В 2004 году Агентством по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Республики Таджикистан были оформлены паспорта указанных радиоактивных хвостохранилищ Таджикистана [12]. В 2024 году в них были внесены уточнения и дополнения. Обобщенные сведения о радиоактивных хвостохранилищах Таджикистана представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сведения о радиоактивных хвостохранилищах Таджикистана [4, 12]
[Table 1. Information about radioactive tailing ponds in Tajikistan] [4, 12]

Наименование объекта и его место расположения [Name of the object and its location]	Период эксплуатации [Period of operation]	Тип хвостохранилища [Type of tailings pond]	Способ укладки хвостов [Method of laying tails]	Кол-во отходов, млн тонн [Amount of waste, million tons]	Площадь, га [Area, ha]	Высота дамбы, м [Dam height, m]	Слой грунтового покрытия, м [Primer layer, m]
Адрасманское хвостохранилище, пос. Адрасман, 1,0 км [Adrasman tailing pond, Adrasman village, 1.0 km]	1945–1955 гг.	овражный [ravine]	насыпной [bulk]	0,4	3,2	14	0,3 – 0,5
Гафуровское хвостохранилище, г. Гафуров, 0,5 км [Gafurov tailing pond, Gafurov city, 0.5 km]	1945–1950 гг.	равнинный [flat]	намывной [alluvial]	0,4	5	–	2,4 – 2,5
Дигмайское хвостохранилище, пос. Газиен, 1,5 км [Digmay tailing pond, Gaziyon village, 1.5 km]	1963–1991 гг.	овражный [ravine]	намывно-наливной [alluvial-filling]	36	90	35	отсутствует [absent]
Отвалы «Фабрика бедных руд», г. Истиклол, 4,0 км [Waste ponds of the "Poor Ore Factory", Istiklol city, 4.0 km]	1950–1965 гг.	овражно-равнинный [ravine-plain]	насыпной [bulk]	2,0	14,5	–	1,0 – 1,5
Хвостохранилище I-II очереди, г. Истиклол, 2,0 км [Tailings ponds of the I-II stages, Istiklol city, 2.0 km]	1945–1959 гг.	овражный [ravine]	намывной [alluvial]	1,59	15,7	16	1,0 – 1,5
Хвостохранилища III очереди, г. Истиклол, 0,5 км [Tailing pond of the III stage, Istiklol city, 0.5 km]	1947–1963 гг.	овражный [ravine]	намывной [alluvial]	1,8	8,7	14	1,0 – 1,5

Наименование объекта и его место расположение [Name of the object and its location]	Период эксплуатации [Period of operation]	Тип хвостохранилища [Type of tailings pond]	Способ укладки хвостов [Method of laying tails]	Кол-во отходов, млн тонн [Amount of waste, million tons]	Площадь, га [Area, ha]	Высота дамбы, м [Dam height, m]	Слой грунтового покрытия, м [Primer layer, m]
Хвостохранилище IV очереди, г. Истиклол, 1,0 км [Tailing pond of the IV stage, Istiklol city, 1.0 km]	1949–1965 гг.	овражный [ravine]	намывной [alluvial]	4,13	17,1	18	1,0 – 1,5
Хвостохранилище цеха № 3, г. Истиклол, 3,0 км [Tailings pond of the plant No.3, Istiklol city, 3.0 km]	1949–1965 гг.	овражно-равнинный [ravine-plain]	насыпной [bulk]	1,17	2,86	–	0,5 – 0,7
Хвостохранилища «Карты 1-9», г. Бустон, 2,0 км [Tailing pond "Maps 1-9", Buston city, 2.0 km]	1949–1967 гг.	равнинный [flat]	намывной [alluvial]	4,0	18	–	1,0 – 1,5
Рудник-3, г. Худжанд, 2,0 км [Mine-3, Khujand city, 2.0 km]	1976–1985 гг.	косогорный [hillside]	насыпной [bulk]	0,36	5,9	–	0,5 – 0,7

Характеризация площадки необходима для получения достаточного объема исходных данных, обеспечивающих принятие обоснованных стратегических решений на ранних этапах. Результаты характеризации используются при формировании рациональной стратегии разработки программ мониторинга для конкретной площадки, а также при оценке безопасности реабилитационных проектов, планов радиационной защиты, планов обращения с отходами и иной документации по реабилитации. Для установления факта наличия или отсутствия загрязнения программа характеризации должна в первую очередь определить характер и уровень загрязнения. Мероприятия по характеризации площадки проводятся с целью оценки рисков, связанных с загрязнением, и определения параметров, необходимых для выбора оптимальной технологии реабилитации. В соответствии с действующими правилами должны быть сформулированы цели сбора данных с учетом соответствующих неопределенностей.

Результаты анализа радиоактивности хвостовых материалов всех хвостохранилищ уранового производства Таджикистана свидетельствуют о низком уровне их активности. Как следует из данных работ авторов [13–17], активность хвостовых материалов варьируется от 5,92 ТБк (Адрасманское хвостохранилище) до 156,06 ТБк (Дигмайское хвостохранилище). Обобщенная радиоэкологическая характеристика радиоактивных хвостохранилищ Таджикистана представлена в таблице 2.

Радиационная обстановка на хвостохранилищах и в зонах их воздействия

Результаты анализа радиоактивности хвостовых материалов всех хвостохранилищ уранового производства Таджикистана свидетельствуют о низком уровне их активности. Как следует из данных работ авторов [13–17], активность хвостовых материалов варьируется от 5,92 ТБк (Адрасманское хвостохранилище) до 156,06 ТБк (Дигмайское хвостохранилище). Обобщенная радиоэкологическая характеристика радиоактивных хвостохранилищ Таджикистана представлена в таблице 2.

Таблица 2. Радиоэкологическая характеристика радиоактивных хвостохранилищ Таджикистана
[Table 2. Radioecological characteristics of radioactive tailing ponds in Tajikistan]

Объект [Object]	Радиоэкологический фактор [Radioecological factor]	Естественное фон [Natural background]	Значения [Values]	
			среднее [average]	интервал [interspace]
Адрасманское хвостохранилище [Adrasman tailing pond]				
Воздух [Air]	ЭРОА радона, Бк/м³ [Radon EEC, Bq/m³]	1,8	7,02	2,3 – 10
	ППР, мБк/(м²·с) [RER, mBq/(m²·s)]	16	460	160 – 720
Почва [Soil]	Суммарная α-активность ЕРН, Бк/кг [Gross α-activity NRN, Bq/kg]	220	1100	1070 – 5986
Хвосты [Tailings]	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [ADER of gamma radiation, μSv/h]	0,15	0,30	0,2 – 1,25
	A _{эфф.} ЕРН, Бк/кг [A _{эфф.} NRN, Bq/kg]	750	14800	1100 – 27300
	Суммарная активность, ТБк [Total activity, TBq]		5,92	
Гафуровское хвостохранилище [Gafurov tailing pond]				
Воздух [Air]	ЭРОА радона, Бк/м³ [Radon EEC, Bq/m³]	1,8	33	22 – 33
	ППР, мБк/(м²·с) [RER, mBq/(m²·s)]	16	300	220 – 830

Объект [Object]	Радиоэкологический фактор [Radioecological factor]	Естественное фон [Natural background]	Значения [Values]	
			среднее [average]	интервал [interspace]
Хвосты [Tailings]	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [ADER of gamma radiation, $\mu\text{Sv/h}$]	0,15	0,17	0,15 – 0,20
	$A_{\text{эфф}}$ ЕРН, Бк/кг [$A_{\text{эфф}}$ NRN, Bq/kg]	85,2	6693	200 – 15200
	Суммарная активность, ТБк [Total activity, TBq]		6,85	
Дигмайское хвостохранилище [Digmay tailing pond]				
Воздух [Air]	ЭРОА радона, Бк/м ³ [Radon EEC, Bq/m ³]	1,8	109	10,3 – 464,1
	ППР, мБк/(м ² ·с) [RER, mBq/(m ² ·s)]	20	6200	2100 – 17890
	Суммарная α -активность ЕРН, Бк/м ³ [Gross α -activity NRN, Bq/m ³]	0,00036	0,0035	0,0007 – 0,0029
Вода из наблюда- тельных скважин [Water from observa- tion wells]	Удельная активность ²²⁶ Ra, Бк/л [Activity concentration ²²⁶ Ra, Bq/l]	0,007	0,15	0,07 – 0,36
Почва [Soil]	Суммарная α -активность ЕРН, Бк/кг [Gross α -activity NRN, Bq/kg]	212	56880	900 – 13500
Хвосты [Tailings]	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [ADER of gamma radiation, $\mu\text{Sv/h}$]	0,15	5,24	4 – 20
	$A_{\text{эфф}}$ ЕРН, Бк/кг [$A_{\text{эфф}}$ NRN, Bq/kg]	30,3	17597	8492 – 27631
	Суммарная активность, ТБк [Total activity, TBq]		156,06	
Отвалы «Фабрика бедных руд» [Waste ponds of the "Poor Ore Factory"]				
Воздух [Air]	ЭРОА радона, Бк/м ³ [Radon EEC, Bq/m ³]	1,92	17	16 – 92
	ППР, мБк/(м ² ·с) [RER, mBq/(m ² ·s)]	90	900	860 – 1060
	Суммарная α -активность ЕРН, Бк/м ³ [Gross α -activity NRN, Bq/m ³]	0,00085	0,0012	0,0008 – 0,0032
Отвалы горных пород [Rock dumps]	Суммарная α -активность ЕРН, Бк/кг [Gross α -activity NRN, Bq/kg]	220	1345	1260 – 1455
	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [ADER of gamma radiation, $\mu\text{Sv/h}$]	0,17	0,78	0,4 – 1,38
Отвалы «Фабрика бедных руд» [Waste ponds of the "Poor Ore Factory"]	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [ADER of gamma radiation, $\mu\text{Sv/h}$]	0,17	0,30	0,17 – 0,65
	$A_{\text{эфф}}$ ЕРН, Бк/кг [$A_{\text{эфф}}$ NRN, Bq/kg]	1200	2355	1480 – 3230
	Суммарная активность, ТБк [Total activity, TBq]		9,36	
Хвостохранилища I-II очереди [Tailings ponds of the I-II stages]				
Воздух [Air]	ЭРОА радона, Бк/м ³ [Radon EEC, Bq/m ³]	1,92	2,57	2,0 – 6,04
	ППР, мБк/(м ² ·с) [RER, mBq/(m ² ·s)]	90	3800	2560 – 4020
Дренажная вода [Drainage water]	Удельная активность ²²⁶ Ra, Бк/л [Activity concentration ²²⁶ Ra, Bq/l]	0,037	0,175	0,16 – 0,21
Хвосты [Tailings]	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [ADER of gamma radiation, $\mu\text{Sv/h}$]	0,20	0,26	0,20 – 0,38
	$A_{\text{эфф}}$ ЕРН, Бк/кг [$A_{\text{эфф}}$ NRN, Bq/kg]	1200	6485	5460 – 8500
	Суммарная активность, ТБк [Total activity, TBq]		8,07	
Хвостохранилища III-IV очереди [Tailings ponds of the III-IV stages]				
Воздух [Air]	ЭРОА радона, Бк/м ³ [Radon EEC, Bq/m ³]	1,92	5,6	3,0 – 8,78
	ППР, мБк/(м ² ·с) [RER, mBq/(m ² ·s)]	90	4800	3560 – 5900

Объект [Object]	Радиоэкологический фактор [Radioecological factor]	Естественное фон [Natural background]	Значения [Values]	
			среднее [average]	интервал [interspace]
Почва [Soil]	Суммарная α -активность ЕРН, Бк/кг [Gross α -activity NRN, Bq/kg]	220	4126	1370 – 84117
Хвосты [Tailings]	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [ADER of gamma radiation, μ Sv/h]	0,17	0,28	0,18 – 0,36
	$A_{\text{эфф}}$ ЕРН, Бк/кг [$A_{\text{эфф}}$ NRN, Bq/kg]	1200	9759	1583 – 28134
	Суммарная активность, ТБк [Total activity, TBq]		27,45	
Хвостохранилище «Карты 1-9» [Tailing pond "Maps 1-9"]				
Воздух [Air]	ЭРОА радона, Бк/м ³ [Radon EEC, Bq/m ³]	1,8	23	7 – 23
	ППР, мБк/(м ² ·с) [RER, mBq/(m ² ·s)]	16	940	630 – 1250
Почва [Soil]	Суммарная α -активность ЕРН, Бк/кг [Gross α -activity NRN, Bq/kg]	85,2	1050	912 – 6598
Хвосты [Tailings]	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [ADER of gamma radiation, μ Sv/h]	0,18	0,45	0,4 – 0,6
	$A_{\text{эфф}}$ ЕРН, Бк/кг [$A_{\text{эфф}}$ NRN, Bq/kg]	1200	4956	390 – 19230
	Суммарная активность, [ТБк Total activity, TBq]		28,82	

ЭРОА радона – эквивалентная равновесная объемная активность радона [Radon EEC – radon equilibrium equivalent concentration];

ППР – плотности потока радона [RER – radon exhalation rate];

ЕРН – естественные радионуклиды (²³⁸U, ²³⁴U, ²³⁰Th, ²²⁸Th, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po) [NRN – natural radionuclides (²³⁸U, ²³⁴U, ²³⁰Th, ²²⁸Th, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po)];

МАЭД гамма-излучения – мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения [ADER of gamma radiation – ambient dose equivalent rate of gamma radiation].

Из таблицы 2 видно, что большинство показателей превышает фоновые значения. Средний радиационный фон над хвостохранилищами и в их окрестностях в 6-8 раз превышает естественный уровень и составляет 0,2-1,25 мкЗв/ч (Адрасманское хвостохранилище), 4-20 мкЗв/ч (Дигмайское хвостохранилище). Это связано с тем, что отдельные хвостохранилища не имеют достаточного поверхностного покрытия либо оно, полностью отсутствует (например, Дигмайское хвостохранилище), а в ряде случаев наблюдается нарушение или смыл хвостового материала (Адрасманское хвостохранилище). Кроме того, расстояние от объекта до населенных пунктов и источников водоснабжения является минимальным, а также имеет место проницаемость защитных барьеров объекта и ряд других факторов.

Согласно данным авторов [18], при оценке доз облучения по водному пути учитывалась исключительно удельная активность естественных радионуклидов (²³⁸U, ²³⁴U, ²²⁶Ra) в водной среде. Такой подход является обоснованным, поскольку вклад указанных радионуклидов в суммарную дозу облучения по водному пути, как правило, составляет 95–99 %. В связи с этим содержание ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²³⁰Th и ²²⁸Th при расчете доз по водному пути не принималось во внимание.

По хвостохранилищам г. Истиклола.

Дополнительно проведенный анализ концентрации

урана в водных объектах, расположенных на промплощадке г. Истиклола, показал, что её значения варьируются в пределах от 1,26 до 50,8 мг/дм³. При этом воды карьерных выработок, дренажи штолен, а также хвостохранилища радиоактивных отходов I–II очередей г. Истиклола характеризуются удельной активностью урана-238 в пределах от 15 до 26 Бк/кг, существенно превышающей уровни вмешательства, что исключает возможность их использования в целях водоснабжения. Уровень вмешательства составляет 3,1 Бк/кг¹.

Следует отметить, что использование для питья дренажных и шахтных вод с высокими уровнями загрязнения в г. Истиклоле местным населением может привести к превышению предела дозы в 1 мЗв/год. Например, годовые дозы облучения за счет использования шахтной воды для питья составляют от 0,82 мЗв/год до 1,30 мЗв/год, для полива – от 0,07 мЗв/год до 0,11 мЗв/год, а за счет использования воды из уранового карьера для питья – от 0,94 мЗв/год до 1,70 мЗв/год.

По Адрасманскому хвостохранилищу

По данным радиационного мониторинга, проведенного Мирсаидовым У.М. и др., вынос хвостового материала из тела хвостохранилища в окружающую среду характеризуется негативной динамикой и способствует росту радиационного риска [19].

По дренажу шахтных вод в районе г. Худжанда

На сегодняшний день из штолен уранового месторождения Киик-Тал продолжается истечение урансодержащих вод

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ-06) СП 2.6.1.001-06: зап. 16.01.2007 г. Душанбе: Минюст Республики Таджикистан, 2007. 172 с. [Radiation Safety Norms (NRB-06) SP 2.3.1.001-06: regist. 16.01.07. Dushanbe: Ministry of Justice of Republic of Tadjikistan; 2007. 172 p. (In Russ.)]

с концентрацией около 20 мг/дм^3 и расходом $4,1\text{--}4,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, которые на протяжении длительного времени оказывают загрязняющее воздействие на окружающую среду [11].

Радиоэкологические риски в зоне влияния радиоактивных хвостохранилищ

В настоящее время радиоэкологические риски рассматриваются как один из базовых инструментов комплексной оценки состояния окружающей среды, в том числе в рамках экологического нормирования, предусматривающего регулирование как концентраций загрязняющих веществ в компонентах природной среды, так и степени их антропогенной трансформации [20, 21].

Для Дигмайского хвостохранилища

Для хранилища характерен комплекс радиоэкологических рисков, которые на протяжении длительного времени оказывают негативное воздействие на экосистемы прилегающей территории. После прекращения деятельности гидрометаллургического завода в 1996 г., а также вследствие засушливых климатических условий, вода с зеркальной поверхности хвостохранилища испарилась, при этом часть водных масс дренировалась вниз по рельефу местности. В результате на поверхности хвостохранилища образовались большие трещины, так называемые «такры», шириной до 1 м и глубиной более 4 м, что привело к формированию здесь высокой эксхалляции ^{222}Rn (объемная активность в приземном слое воздуха – $540\text{--}2500 \text{ Бк/м}^3$) [22].

В работах [19, 23] отмечено, что основными факторами радиационного риска являются гамма-излучение, ингаляционное поступление радиоактивных аэрозолей, а также высокое содержание радона в воздухе. Среднее значение плотности потока радона находится в пределах от 10000 до $65000 \text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$, а годовое поступление радона в атмосферу составляет больше чем 30 ТБк. Значения МАЭД на территории хвостохранилища находятся в пределах $4\text{--}20 \text{ мкЗв/ч}$.

По хвостохранилищам г. Истиклола

Особую проблему комплекса захоронений в г. Истиклоле представляют дренажи остаточных кислотных растворов, которые выклиниваются в виде родников из-под мест захоронений. В частности, в роднике у подножья хвостохранилища I-II очереди. Концентрация сульфат-ионов составляет $9200\text{--}9600 \text{ мг/л}$, карбонатных оснований 18 мг/л [24].

Оценка наличия загрязненных участков и необходимости проведения реабилитационных мероприятий осуществляется с учетом текущего целевого использования территории, включая прилегающие зоны. Площадка не считается загрязненной, если удельная активность всех радионуклидов рядов урана-238 и тория-232 не превышает 1 Бк/г , независимо от характера, площади и способа использования земель.

С учетом категорий опасности вышеуказанных радиоактивных хвостохранилищ и степени исходящей от них угрозы определен следующий приоритетный порядок проведения мероприятий на радиационно-опасных объектах:

1. Отвалы «Фабрики бедных руд» относятся к 1, 2 и 3 категориям опасности. Уровень естественного разрушения – высокий. Опасность объекта обусловлена наличием непокрытых поверхностей, отсутствием ограждений, расположением выше русла реки, неконтролируемыми эрозионными процессами (водная эрозия, сели, оползни), выделением радона, радиационным воздействием и распространением радиоактивной пыли.

2. Дигмайское хвостохранилище также относится к 1, 2 и 3 категориям опасности. Уровень естественного разрушения также высокий. Угроза обусловлена отсутствием покрытия поверхности, частичным отсутствием ограждений, расположением на расстоянии около 1,5 км выше населенного пункта и выше реки Сырдарья, процессами почвенного сползания и селями, структурным разрушением, выделением радона, радиационным воздействием и распространением радиоактивной пыли.

3. Адрасманское хвостохранилище относится к 2 и 3 категориям опасности. Уровень естественного разрушения – средний. Опасность связана с отсутствием ограждений, близостью населенного пункта, водной эрозией и водосмывом, частичным отсутствием защитного покрытия, расположением выше по течению реки и населенного пункта, выделением радона и наличием дренажных вод.

4. Хвостохранилище цеха № 3 (г. Истиклол) также относится к 2 и 3 категориям опасности. Уровень естественного разрушения оценивается как средний. Источниками опасности являются расположение объекта в пределах городской застройки, водная эрозия и водосмыв, отсутствие ограждений, а также влияние шахтных вод.

5. Остальные радиоактивные хвостохранилища характеризуются более низким уровнем опасности, поскольку их поверхности покрыты нейтральным грунтом.

В ходе выполненных мониторинговых работ Мирсаидовым У. и соавт. проанализировано состояние здоровья населения, проживающего вблизи хвостохранилищ. Установлено, что ряд медико-демографических показателей в северных районах Таджикистана хуже по сравнению с другими регионами. В частности, отмечаются сниженные показатели рождаемости, повышенные уровни общей и младенческой смертности, а также высокая заболеваемость болезнями крови, органов дыхания, эндокринной системы, осложнениями беременности и врожденными аномалиями у новорожденных. В населенных пунктах, расположенных вблизи хвостохранилищ (Истиклол, Бустон, Адрасман, Дигмай), указанные тенденции выражены наиболее отчетливо [19].

Комплекс мероприятий, направленных на снижение радиоэкологического воздействия радиоактивных хвостохранилищ урановой промышленности

По итогам проведенного анализа определены ключевые радиоэкологические риски для всех урановых хвостохранилищ, расположенных на территории Северного Таджикистана. Выявленные риски систематизированы и ранжированы по уровню опасности, а также разработан комплекс мероприятий, направленных на снижение их негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

Экологическая реабилитация хвостохранилищ с урановыми отходами на территории г. Истиклола (Таджикистан) представляет собой актуальную задачу, учитывая высокую концентрацию объектов уранового наследия в регионе, включая хвостохранилища, отходы и отвалы. Общий объем накопленных материалов составляет около 15 млн тонн хвостов и 50 млн тонн забалансовых руд, образовавшихся в период с 1945 по 1965 год при переработке урановой руды на промплощадке «Табошар». В 1973–1975 гг. хвостохранилища I-IV очередей г. Истиклола были законсервированы: поверхность и откосы покрыли слоем местного крупнообломочного грунта с супесчаным заполнителем толщиной

до 1 м. Тем не менее, такое покрытие является недостаточно эффективным, поскольку не препятствует доступу кислорода и проникновению атмосферных осадков в тела хвостохранилищ, что сохраняет риск негативного воздействия на окружающую среду [12].

Для уменьшения рисков радиационного воздействия на здоровье населения и улучшения экологической ситуации в Республике Таджикистан было принято девять законодательных и пять нормативно-правовых актов, регулирующих обеспечение радиационной безопасности в стране.

Одним из ключевых нормативно-правовых документов, регулирующих реабилитацию урановых хвостохранилищ в Республике Таджикистан, являются «Нормы и правила по проведению реабилитации территорий, загрязненных радиоактивными материалами», разработанные и утвержденные постановлением директора Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана № 88 от 3 декабря 2020 г.

В соответствии с данной нормативной базой, Национальной концепцией и установленными правилами в 2022–2023 гг., впервые в новейшей истории страны в рамках международного проекта стран СНГ «Межгосударственная программа» были проведены работы по реабилитации четырех крупных радиоактивных хвостохранилищ I–IV очередей и отвала «Фабрики бедных руд» на промплощадке «Табошар» в г. Истиклоле. В результате выполненных мероприятий высота отвала «Фабрики бедных руд» была снижена с 65 до 30 м в соответствии с проектными требованиями, а его поверхность покрыта нейтральным грунтом, что привело к увеличению территории отвала с 7,9 га до 14,5 га. Поверхность хвостохранилищ I, II, III и IV очередей была также покрыта нейтральным грунтом толщиной от 0,5 до 1,5 м на площадях 8,6 га, 7,1 га, 8,7 га и 17,1 га соответственно. Общая площадь проведенной реабилитации хвостохранилищ г. Истиклола составила 56 га. Измерения мощности дозы на указанных объектах показали, что после завершения реабилитационных работ уровень радиационного воздействия на поверхности хвостохранилищ существенно снизился, что положительно скажется на охране здоровья населения и защите окружающей среды в регионе [25].

Для дальнейшей минимизации радиоэкологических рисков в районах размещения радиоактивных хвостохранилищ урановой отрасли предлагается реализовать нижеперечисленные меры.

По хвостохранилищам г. Истиклола.

Осуществить захоронение порядка 30 млн тонн низкоактивных отвальных горных пород, образовавшихся в результате вскрышных работ на территории г. Истиклола, в отработанном карьере уранодобычи. Разработать и внедрить методы очистки вод карьера и дренажных вод штольни № 6, загрязненных радионуклидами, до уровня, пригодного для хозяйственно-бытового использования населением города. На территории выявлены остатки сооружений и здания бывшего ГМЗ, обрушение которых представляет угрозу для жизни населения. В связи с этим требуется демонтаж аварийных конструкций с последующим их укрытием (консервацией). Хвостохранилище цеха № 3 ГМЗ характеризуется недостаточным покрытием поверхности, в связи с чем необходимо проведение рекультивационных работ на данном участке.

По Дигмайскому хвостохранилищу

Учитывая, что оно является одним из крупнейших хвостохранилищ в странах Центральной Азии, имеет открытую поверхность и относится к числу наиболее опасных источников радиоэкологических рисков, целесообразно организовать и реализовать комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на снижение уровня опасности. В частности, рекомендуется проведение рекультивационных работ с покрытием поверхности хвостохранилища нейтральным грунтом, завозимым из прилегающих холмов. Пульпопровод и устаревшие насосные станции № 1 и № 2, загрязненные радионуклидами, имеют несанкционированный доступ для населения. Рекомендуется провести демонтаж трубопроводов с последующим захоронением отходов на Дигмайском хвостохранилище.

По Адрасманскому хвостохранилищу

Для снижения негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения необходимо переместить хвостовые материалы в безопасное место. В случае невозможности перемещения и с учетом риска водной эрозии следует организовать строительство водоотводного сооружения.

По шахтным водам, содержащим уран, в окрестностях г. Худжанда

Для уменьшения риска распространения радионуклидов и тяжелых металлов рекомендуется внедрение современных технологий очистки урансодержащих вод.

Заключение

Проведенные рекультивационные работы на площадках г. Истиклола способствовали снижению радиационного воздействия на население и окружающую среду. Общая площадь рекультивированных хвостохранилищ составила 56 га, поверхности покрыты нейтральным грунтом толщиной 0,5–1,5 м. Высота отвала «Фабрики бедных руд» снижена с 65 до 30 м, а покрытие поверхностей хвостохранилищ «I–IV очередей» значительно улучшено. Уровень радиационного фона на рекультивированных участках снизился в десять раз и составил 0,3 мкЗв/ч, что соответствует установленным нормативным требованиям.

С учётом успешного опыта восстановления загрязнённых территорий г. Истиклола предлагается продолжить реализацию рекультивационных проектов, включая территорию хвостохранилища цеха № 3 бывшего ГМЗ г. Истиклола, где наблюдается недостаточное покрытие поверхности, а также остатки разрушенных сооружений и зданий.

В перспективе планируется реализация проекта по рекультивации Дигмайского хвостохранилища с учётом демонтажа загрязнённого радионуклидами пульпопровода длиной 6 км от ГМЗ до хвостохранилища, а также насосных станций № 1 и № 2.

Хвостовые материалы Адрасманского хвостохранилища следует переместить в безопасное место; при невозможности переноса необходимо организовать водоотводное сооружение для защиты от эрозии.

Реализовать государственную программу безопасного управления урановым наследием с организацией долгосрочного радиоэкологического мониторинга.

Выполнение указанных мероприятий обеспечит значительное снижение радиационного и экологического риска для населения и окружающей среды, а также создаст основу для безопасного дальнейшего использования территории.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Мирсаидов У. – разработка концепции, осуществление общего научного руководства исследованием, утверждение окончательного варианта рукописи.

Назаров Х.М. – написание текста статьи и анализ данных.

Мирсаидзода И. – критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

Саидзода В.Я. – поиск и анализ литературы, анализ и интерпретация результатов.

Азизов О.А. – интерпретация литературных данных и перевод текста.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории технических услуг Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана за оказание содействия в организации и проведении исследований. Авторы также признательны рецензентам за ценные комментарии, которые помогли улучшить качество нашей статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследования выполнены в рамках научно-исследовательских работ Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана на тему: «Радиоэкологическая оценка и радиационный мониторинг экосистем на примере Таджикистана» (2025–2029 гг.). Гос. регистрация №0125 TJ 1657.

Литература

- Мирсаидов У.М., Хакимов Н., Назаров Х.М. Ядерное наследие Советского Союза в Таджикистане: проблемы и решения. В кн.: Радиоэкологический мониторинг биосреды и радиационная безопасность Таджикистана. Душанбе. АЯРБ АН РТ, 2010. С.58–64.
- Хакимов Н., Назаров Х.М., Мирсаидов И.У. Физико-химические и технологические основы переработки отходов урановой промышленности / Под ред. У. Мирсаидова. Душанбе: Дониш, 2011. 125 с.
- Khakimov N., Nazarov Kh.M., Mirsaidov I.U. Physico-chemical and manufacturing basis for uranium concentrates production from wastes of hydrometallurgical plants and technical waters. Ed.: academician AS RT U. Mirsaidov. Dushanbe: Mavlavi, 2012. 120 p.
- Мирсаидов И., Назаров Х.М., Саломов Дж.А. Радиоактивные хвостохранилища Таджикистана: проблемы и решения / Под ред. У.М. Мирсаидова. Душанбе: ООО «Аршан», 2022. 206 с.
- Фильцер Ю., Ларин В., Разыков З. Пионеры секретного атома. Чкаловск. ГП «Востокредмет», 1995. 68 с.
- Нестеров Ю.В., Петрухин Н.П. Сырьевая база атомной промышленности. События, люди, достижения / Под ред. Н.П. Петрухина. М.: Атомредметзолото, 2015. 288 с.
- Mirsaidov U., Nazarov Kh.M., Boboev B.D., et al. Assessment of the Potential Radiation Hazard of the Adrasman Tailing Dump (Tajikistan) for the Population Living Around It // Journal of Health and Environmental Research. 2022. Vol. 8, № 2. P. 151–158. DOI: 10.11648/j.jher.20220802.20.
- Хакимова Н.У., Зоитова М.А. Урановые хвостохранилища г. Истиклола: история, проблемы, решения // Радиационная гигиена. 2023. Т.16, № 2. С. 102–113. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-102-113.
- Мирсаидзода И., Ахмедов М.З., Баротов Б.Б. и др. Радиоэкологическая ситуация в Республике Таджикистан / Под ред. У.М. Мирсаидова. Душанбе: Дониш, 2021. 114 с.
- Назаров Х.М., Саломов Дж.А., Хакимов Н. и др. Радиационный мониторинг хвостохранилища «Дигмай» // Известия АН Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2015. Т. 159, № 2. С.78–82.
- Рахматов Н.Н. Физико-химические основы получения урановых концентратов из супесчаных почв и шахтных вод: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Душанбе, 2016. 22 с.
- Паспорта радиоактивных хвостохранилищ Северного Таджикистана. Агентство по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан. Душанбе, 2004. 6 с.
- Назаров Х.М., Эрматов К.А., Саломов Дж.А. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности бывших урановых объектов для населения г. Истиклол Республики Таджикистан // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 83–90. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-83-90.
- Ахмедов М.З., Назаров Х.М., Рахимбердиев Ш, Мирсаидов У. Естественные радионуклиды в почвах на территории ареала хвостохранилища «Адрасман» // Доклады НАН Таджикистана. 2023. Т. 66, № 5–6. С. 331–336.
- Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М., Мухамедова С.Г., Мирсаидов У.М. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 115–121. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-115-121.
- Mirsaidov U., Nazarov Kh.M., Tillozoda H.I., et al. Ways to reduce the risk of radioactive contamination at the Digmai tailing pond in Tajikistan // Ecological Engineering & Environmental Technology. 2026. Vol. 27, № 2. P. 424–430. DOI: 10.12912/27197050/217565.
- Мирсаидов У.М., Назаров Х.М., Шосафарова Ш.Г., Махмудова М.М. Радоновый мониторинг на территории Северного Таджикистана // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 68–73. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73.
- Мирсаидов У.М., Назаров Х.М., Махмудова М.М. и др. Сравнительная оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилищ Согдийской области Таджикистана // Радиация и риск. 2022. Т. 31, № 2. С. 118–127. DOI: 10.21870/0131-3878-2022-31-2-118-127.
- Мирсаидов У.М., Ахмедов М.З., Махмудова М.М., Шосафарова Ш.Г. Радиационно-гигиенический мониторинг на объектах уранового наследия северного Таджикистана. Материалы международной конференции «Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века». – Минск: ИВЦ Минфина, 2019. Ч. 2. С. 276–279. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/231386> (Дата обращения 15.02.2026).
- Башкин В.Н. Экологические риски: определения и расчеты // Проблемы анализа риска. 2014. Т. 11, № 5. С. 4–5.
- Лаврентьева Г.В., Мирзеабасов О.А., Сынзыныс Б.И., Гешель И.В. Радиационный экологический риск для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов // Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 4. С. 65–75. DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-65-75.
- Беззубов Н.И., Юнусов М.М., Разыков З.А., Файзуллаев Б.Г. Оценка воздействия Дигмайского хвостохранилища на окружающую среду. Сборник докладов II-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы урановой промышленности». Алматы. Казатомпром. 2002. С. 181–183.

23. Назаров Х.М., Бобоев Б.Д., Эрматов К.А. Оценка радионормативности территории Дигмайского хвостохранилища // XXI век. Техносферная безопасность. 2017. Т. 2, № 3. С. 44–48.
24. Назаров Х.М., Саломов Дж.А., Хакимов Н. и др. Экологические аспекты реабилитации урановых хвостохранилищ г.Истиклола республики Таджикистан // Известия АН Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2015. Т. 159, № 2. С. 87–92.
25. Назаров Х.М., Ахмедов М.З., Рахимбердиев Ш.А., Мирсаидов У.М. Радиоэкологический мониторинг хвостохранилищ города Истиклол до и после рекультивационных работ. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены». Санкт-Петербург. 2023. С. 210–214.

Поступила: 16.02.2026

Мирсаидов Улмас – доктор химических наук, профессор, академик НАН Таджикистана, главный научный сотрудник Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан; ORCID: 0009-0003-8023-8771, РИНЦ Author ID: 787421

Назаров Холмурод Марипович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Филиала Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана в Согдийской области. **Адрес для переписки:** 735730, Таджикистан, г. Бустон, ул. Б. Гафурова, 1А; E-mail: holmurod18@mail.ru; ORCID: 0009-0001-5844-6166, РИНЦ Author ID: 787458

Мирсаидзода Илхом – доктор технических наук, профессор, директор Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан; ORCID: 0009-0001-4846-319X, РИНЦ Author ID: 787468

Саидзода Вайсиддин Ятим – докторант Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан; ORCID: 0000-0002-0805-9555, РИНЦ Author ID: 1276421

Азизов Олимджон Азизович – кандидат технических наук, начальник отдела менеджмента и связей с общественностью Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан; ORCID: 0009-0008-1923-1139; РИНЦ Author ID: 1868-2647

Для цитирования: Мирсаидов У., Назаров Х.М., Мирсаидзода И., Саидзода В.Я., Азизов О.А. Радиоэкологические аспекты управления хвостохранилищами урановой промышленности Таджикистана // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 84–94. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-84-94

Radioecological aspects of the management of uranium industry tailings in Tajikistan

Ulmas Mirsaidov¹, Kholmurod M. Nazarov², Ilhom Mirsaidzoda¹, Vaysiddin Y. Saidzoda¹, Olimjon A. Azizov¹

¹ Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

² Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan's Branch in Sughd Region, Buston, Tajikistan

People and the environment must be protected from radiation risks now and in the future. In this regard, the aim of this work was to summarize the existing data on the tailings of the uranium industry in Tajikistan and to develop scientifically grounded radiation-hygienic approaches to the management of low-level radioactive waste. The objective of the research was to analyze the formation of radioactive tailings in the territory of Tajikistan. Materials and Methods: The information base of the research was the results of previously conducted scientific works. The main characteristics of tailings storage facilities, as well as their radiation impact on the environment, have been examined. Particular attention is given to the issues of categorization and passportization of radioactive waste. Radiation monitoring was carried out using modern measuring instruments and equipment manufactured in the Russian Federation ("Doza"), the Republic of Belarus ("Atomtech"), the USA ("Canberra"), and Germany ("Thermo"). Results and Discussion: Existing radioecological risks in the areas where unsealed tailings pond is located have been identified. The radiation and hygiene requirements for ensuring the radiation safety of industrial waste have been considered. It is noted that the reclamation work carried out at the facilities in the of Istiklol city has significant practical importance, as it ensured the reduction of the radiation background to the normative level (0.3 $\mu\text{Sv/h}$), decreased the anthropogenic load on the environment, and increased the ecological safety of the population. Conclusion: Promising directions include the continuation of reclamation of problematic areas, including the tailings pond of shop No. 3 of the former hydrometallurgical plant, the implementation of the Digma tailings restoration project with the dismantling of contaminated infrastructure, the adoption of measures to ensure the

Kholmurod M. Nazarov

Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security

Address for correspondence: 1A B. Gafurov Str., Buston, Sughd Region, 735730, Tajikistan; E-mail: holmurod18@mail.ru

safety of the Adrasman tailings pond, as well as the introduction of a state program for the safe management of uranium legacy with a long-term radioecological monitoring system. The comprehensive implementation of the aforementioned measures will ensure further reduction of radiation and environmental risks, create a foundation for the safe and sustainable development of the area, and also enable its safe future use.

Key words: uranium industry, tailings, radionuclides, radioecology, radiation risk, Tajikistan, radiation safety, reclamation.

Authors' personal contribution

Thereby, all authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research, and preparation of the article, as well as read and approved the final version before its publication).

Ulmas Mirsaidov – concept development, overall scientific supervision of the research, approval of the final version of the manuscript.

Kholmurod M. Nazarov – writing the text of the article and data analysis.

Ilhom Mirsaidzoda – critical review with valuable intellectual input.

Vaysiddin Y. Saidzoda – literature search and analysis, analysis and interpretation of results.

Olimjon A. Azizov – interpretation of literature data and translation of the text.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the staff of the Scientific and Technical Support Organization to Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of National Academy of Sciences of Tajikistan for their assistance in organizing and conducting the research.

The authors also thank the reviewers for their valuable comments, which helped improve the quality of our article.

Conflict of interests

The authors state that there is no potential conflict of interest.

Sources of funding

The research was conducted as part of the research project Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan on the topic: "Radioecological assessment and radiation monitoring of ecosystems using Tajikistan as an example" (2025-2029). State Registration No.0125 TJ 1657.

References

1. Mirsaidov UM, Khakimov N, Nazarov KhM. Nuclear legacy of the Soviet Union in Tajikistan: problems and solutions. In the book: Radioecological monitoring of the biological environment and radiation safety of Tajikistan. Dushanbe: NRSA AS RT; 2010, P. 58-64 (In Russian).
2. Khakimov N, Nazarov KhM, Mirsaidov IU. Physico-chemical and technological fundamentals of processing waste from the uranium industry. Ed.: U. Mirsaidov. Dushanbe: Donish; 2011. 125 p. (In Russian).
3. Khakimov N, Nazarov KhM, Mirsaidov IU. Physico-chemical and manufacturing basis for uranium concentrates production from wastes of hydrometallurgical plants and technical waters. Ed.: academician AS RT U. Mirsaidov. Dushanbe: Mavlavi; 2012. 120 p.
4. Mirsaidzoda I, Nazarov KhM, Salomov JA. Radioactive waste tailing dumps in Tajikistan: problems and solutions. Ed.: U.M. Mirsaidov. Dushanbe: Arsham LLC; 2022. 206 p. (In Russian).
5. Filzer Y, Larin V, Razykov Z. Pioneers of the secret atom. Chkalovsk: SE "Vostokredmet"; 1995. 68 p. (In Russian).
6. Nesterov YuV, Petrukhin NP. Raw material base of the nuclear industry. Events, people, achievements. Ed. NP Petrukhina. Moscow: Atomredmetzoloto; 2015. 288 p. (In Russian).
7. Mirsaidov U, Nazarov KhM, Boboev BD, Rahimberdiev ShA, Mukhamedova SG, Akhmedov MZ. Assessment of the Potential Radiation Hazard of the Adrasman Tailing Dump (Tajikistan) for the Population Living Around It. *Journal of Health and Environmental Research*. 2022;8(2): 151-158. DOI: 10.11648/j.jher.20220802.20.
8. Khakimova NU, Zoitova MA. Uranium tailings in the Istiqlol city: history, problems, solutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 102-113 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-102-113.
9. Mirsaidzoda I, Ahmedov MZ, Barotov BB, Nazarov KhM, Khamidov FA. Radioecological condition in the Republic of Tajikistan. Ed.: U.M. Mirsaidov. Dushanbe: Donish; 2021. 114 p. (In Russian).
10. Nazarov KhM, Salomov JA, Khakimov N, Salomov FJ, Rakhmatov NN. Radiation monitoring of the Digmay tailings dump. *Izvestiya AN Respubliki Tadjikistan. Otdeleniye fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Physical, Mathematical, Chemical, Geological, and Technical Sciences*. 2015;159(2): 78-82 (In Russian).
11. Rakhmatov NN. Physico-chemical basis for obtaining uranium concentrates from sandy loam soils and mine waters: abstract of thesis. dis. ...cand. chem. Sci. Dushanbe; 2016. 22 p. (In Russian).
12. Passports of radioactive tailings ponds of Northern Tajikistan. Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Dushanbe; 2004. 6 p. (In Russian).
13. Nazarov KhM, Ermatov KA, Salomov JA, Bahronov SM, Mirsaidov UM. Assessment of potential radiation hazard of the former uranium facilities for the population of the Istiqlol city of the Republic of Tadjikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 83-90. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-83-90.
14. Akhmedov MZ, Nazarov KhM, Rakhimberdiev Sh, Mirsaidov U. Natural radionuclides in soils in the area of the Adrasman tailings dump. *Doklady NAN Tadjikistana = Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan*. 2023;66(5-6): 331-336 (In Russian).
15. Nazarov KhM, Ermatov KA, Bahronov SM, Mukhamedova SG, Mirsaidov UM. Assessment of the potential radiation hazard of the Dehmoy tailings pond (Tajikistan) for the population living around it. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 115-121 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-115-121.
16. Mirsaidov U, Nazarov KhM, Tilozoda HI, Mirzoev DI, Khasanov AF. Ways to reduce the risk of radioactive contamination at the Digmay tailing pond in Tajikistan. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2026;27(2): 424-430. DOI: 10.12912/27197050/217565.
17. Mirsaidov UM, Nazarov KhM, Shosafarova ShG, Mahmudova MM. Radon monitoring on the territory of Northern Tajikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 68-73 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73.

18. Mirsaidov UM, Nazarov KhM, Makhmudova MM, Muratov ShR, Ermatov KA, Akhmedov MZ. Comparison assessment of the potential radiation hazard of tailing dumps in the Sughd region of Tajikistan. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2022;31(2): 118-127 (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2022-31-2-118-127.
19. Mirsaidov UM, Akhmedov MZ, Makhmudova MM, Shosafarova ShG. Radiation-hygienic monitoring at uranium heritage sites in northern Tajikistan / Materials of the international conference "Sakharov readings 2019: environmental problems of the 21st century". Minsk: Information Computing Center of the Ministry of Finance; 2019. Part 2. P. 276-279 (In Russian). Available from: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/231386> [Accessed February 15, 2026].
20. Bashkin VN. Environmental risks: definitions and calculations. *Problemy analiza riska = Problems of risk analysis*. 2014;11: 4-5 (In Russian).
21. Lavrentyeva GV, Mirzeabasov OA, Synzynyns BI, Geshel IV. Radiation ecological risk for the terrestrial ecosystem in the zone close to the radioactive waste storage facility. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2018;27(4): 65-75 (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-65-75.
22. Bezzubov NI, Yunusov MM, Razykov ZA, Faizullaev BG. Assessment of the impact of the Digmay tailings dump on the environment. – In the book: Collection of reports of the II International Scientific and Practical Conference "Current Problems of the Uranium Industry". Almaty: Kazatomprom; 2002. P. 181-183 (In Russian).
23. Nazarov KhM, Boboev BD, Ermatov KA. Radon hazard assessment for the Digmay tailing dump. XXI vek. *Tekhnosfermaya bezopasnost = XXI st century. Technosphere safety*. 2017;2(3): 44-48 (In Russian).
24. Nazarov KhM, Salomov JA, Khakimov N, Rakhmatov NN, Ermatov KA. Environmental aspects of the rehabilitation of uranium tailings in Istiklol, Republic of Tajikistan. News of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. *Izvestiya AN Respubliki Tadzhikistan. Otdeleniye fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Physical, Mathematical, Chemical, Geological, and Technical Sciences*. 2015;159(2): 87-92 (In Russian).
25. Nazarov KhM, Akhmedov MZ, Rakhimberdiev ShA, Mirsaidov UM. Radioecological monitoring of tailings dumps in the city of Istiklol before and after reclamation work. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Topical Issues of Radiation Hygiene". Saint Petersburg; 2023. P. 210-214 (In Russian).

Received: February 16, 2026

Ulmas Mirsaidov – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Chief Research Scientist at the Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan; ORCID: 0009-0003-8023-8771, RSCI Author ID: 787421

For correspondence: Kholmurod M. Nazarov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director of the Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan's Branch in Sughd Region (1a B. Gafurov St., Buston, Sughd Region 735730, Tajikistan; E-mail: holmurod18@mail.ru); ORCID: 0009-0001-5844-6166, RSCI Author ID: 787458

Ilhom Mirsaizoda – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan; ORCID: 0009-0001-4846-319X, RSCI Author ID: 787468

Vaysiddin Y. Saidzoda – PhD student at the Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan; ORCID: 0000-0002-0805-9555, RSCI Author ID: 1276421

Olimjon A. Azizov – Candidate of Technical Sciences, Head of the Management and Public Relations Department of the Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan; ORCID: 0009-0008-1923-1139, RSCI Author ID: 1868-2647

For citation: Mirsaidov U., Nazarov Kh.M., Salomov Dzh.A., Saidzoda V.Ya., Azizov O.A. Radioecological aspects of the management of uranium industry tailings in Tajikistan. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 84–94. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-84-94

Применение различных показателей радиационного риска при медицинском облучении

Репин Л.В.¹, Библин А.М.¹, Водоватов А.В.^{1,2}, Ахматдинов Р.Р.¹

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

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

В последние годы были утверждены несколько методических документов и опубликован ряд научных статей, касающихся оценки радиационных рисков, связанных с медицинским облучением. Оценка риска производится с использованием различных количественных и качественных показателей риска, при этом зачастую не раскрыт вопрос их корректного применения с учетом специфики конкретной ситуации облучения для решения прикладных задач в области управления рисками. Цель исследования – разработка схемы и обоснование метода выбора и применения показателей радиационного риска, связанного с проведением медицинских диагностических рентгенодиагностических процедур в зависимости от цели оценки риска, вида и параметров проведения процедуры, пола и возраста пациента и иных факторов. Материалы и методы: Выполнен анализ показателей радиационного риска на основе обзора литературных источников, сравнительного анализа определений и методов вычисления. Результаты исследования и обсуждение: Проанализированы основные показатели радиационного риска и их область применения; обоснован перечень показателей, рекомендуемых для решения прикладных задач при медицинском диагностическом облучении; предложена качественная шкала уровней риска и схема выбора показателей. Заключение: Разработанный подход позволяет согласовать выбор показателя риска с целью оценки, адресатом информации, дозовой нагрузкой и доступностью исходных данных.

Ключевые слова: радиационный риск, радиационный ущерб, медицинское облучение, оценка риска, стохастические эффекты, малые дозы.

Введение

Стремительное развитие в последние годы методов медицинской диагностики и лечения с использованием источников ионизирующего излучения (ИИ), привело к необходимости развития методологии оценки радиационных рисков, связанных с проведением рентгенодиагностических процедур (РРП).

Необходимость оценки радиационного риска при медицинском диагностическом облучении обусловлена следующими факторами: обоснование проведения РРП для отдельного пациента или группы пациентов со схожими патологическими состояниями должно основываться на сравнении ущерба для здоровья за счет проведения РРП (т.е. радиационного риска) с иными рисками нерадиационной природы, например с рисками ухудшения здоровья или смерти вследствие непроведения необходимой диагностики; оптимизация радиационной защиты пациентов должна проводиться после подтверждения эффективности снижения уровней облучения пациентов и оценки экономической эф-

фективности проводимых мероприятий, в том числе на основе оценки радиационных рисков; в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации¹, пациента или его законных представителей обязаны информировать о возможных вредных последствиях для здоровья вследствие выполнения РРП.

Одной из особенностей процедуры оценки рисков является возможность использования различных количественных показателей на этапе характеристики рисков [1-6], МР 2.6.1.0215-20². В настоящей статье представлены рекомендации по выбору, назначению и корректному применению различных показателей радиационного риска, связанного с проведением РРП.

Стандартная схема оценки рисков для здоровья включает четыре основных этапа [7]:

1. Идентификация опасности.
2. Оценка зависимости «экспозиция-ответ» («доза-эффект»).
3. Оценка экспозиции вредного фактора (дозы облучения).
4. Характеристика рисков.

¹ Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ (ред. от 18.03.2023) «О радиационной безопасности населения» [Federal Law No. 3-FZ dated 09.01.1996 (ed. 18.03.2023) "On Radiation Safety of the Public" (In Russ.)]

² Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований: Методические рекомендации МР 2.6.1.0215-20. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 21.09.2020. [Radiation risk assessment for patients undergoing X-ray radiological examinations. Guidelines MR 2.6.1.0215-20. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 21.09.2020. (In Russ.)]

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: l.repin@niirg.ru

Основную опасность, связанную с воздействием средних и малых доз ИИ на здоровье человека, представляет собой риск развития злокачественных новообразований (ЗНО) и наследственных повреждений в будущем. ЗНО, вызванные воздействием ИИ, не могут проявляться ранее, чем по прошествии минимального латентного периода, который для заболеваний лимфатической и кроветворной ткани составляет от 2 до 5 лет, для опухолей (солидных ЗНО) – примерно от 5 до 10 лет [8].

На этапе оценки зависимости «доза-эффект» количественная оценка возможных негативных для здоровья последствий воздействия ИИ на человека осуществляется на основе линейной беспороговой гипотезы. В настоящее время в области радиационной защиты чаще всего используются модели оценки и межпопуляционного переноса риска, представленные в Публикации 152 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [8]. Однако существуют и другие признанные в научном сообществе модели радиационного риска, пригодные для решения указанной задачи [9–11].

Этап оценки поглощенных доз в отдельных радиочувствительных органах и тканях организма при медицинском облучении представляет собой комплексную задачу в связи с невозможностью достоверно воспроизвести условия облучения для каждого конкретного пациента. Для оценки доз используют: прямые измерения поглощенных доз в антропоморфных фантомах с использованием термолюминесцентных или оптически стимулированных люминесцентных дозиметров; расчет поглощенных доз с использованием специальных калькуляторов доз и наборов коэффициентов перехода к органным дозам, а также упрощенные или полноценные методы Монте-Карло, реализованные в специализированных средах, таких как Geant4 и PENELOPE [12–14]. Определение поглощенных доз в органах и тканях независимо от выбранного метода обычно выполняется для стандартного фантома соответствующей возрастной категории, помещенного в те же условия облучения, что и конкретный пациент.

Наиболее важное значение в практическом смысле представляет завершающий этап оценки рисков – характеристика рисков. Применительно к медицинскому облучению на этапе характеристики радиационных рисков, в зависимости от задач оценки, проводятся: расчет рисков для среднего пациента или отдельных половозрастных групп пациентов; сравнительная оценка рисков различной природы; определение целесообразности и обоснованности применения конкретных методов медицинской диагностики и анализ соотношения выгод и рисков, связанных с применением или неприменением указанных методов.

При характеристике рисков в зависимости от целей оценки и доступности данных допускается использование различных количественных и качественных показателей для описания возможных негативных последствий воздействия ИИ. Неудачный выбор показателей для характеристики рисков в конкретной ситуации медицинского облучения может повлиять на принятие решений. Примером подобного решения может быть отказ пациента или его законного представителя от проведения РПП, сопряженной

с очень малой дозой, по причине того, что для характеристики риска использован показатель «риск развития смертельного ЗНО» без пояснения масштаба риска и ожидаемой диагностической пользы. Другой пример – применение сложного для понимания показателя радиационного ущерба при информировании пациентов и их законных представителей о риске, связанном с рекомендованным методом лучевой диагностики.

Цель исследования – разработка схемы и обоснование метода выбора и применения различных показателей радиационного риска, связанного с проведением медицинских диагностических РПП, в зависимости от цели оценки риска, вида и параметров проведения процедуры, пола и возраста пациента и иных факторов.

Материалы и методы

Работа представляла собой анализ показателей радиационного риска с элементами обзора литературы и сравнительного анализа определений и разработки алгоритма выбора показателей риска для ситуаций медицинского диагностического облучения.

Поиск публикаций выполнялся в базах научных публикаций PubMed, Scopus, Google Scholar и на сайтах международных научных и медицинских организаций. Для поиска использовались ключевые слова: “radiation risk”, “diagnostic exposure”, “lifetime attributable risk”, “LAR”, “excess lifetime risk”, “ELR”, “REID”, “REIC”, “ECI”, “ECD”, “RUD”, “loss of life expectancy”, “years of life lost”, “DALY”, “radiation detriment”, “medical exposure”, “nuclear medicine”, “risk communication”.

Найденные источники включались в обзор при выполнении следующих условий: наличие определения или формул для расчета показателя риска; отношение источника к ИИ, радиационной защите, медицинскому облучению или общим показателям риска для здоровья; возможность определить, какой исход характеризует показатель: заболеваемость, смертность, потерянные годы жизни, качество жизни; возможность оценить применимость показателя к РПП.

Источники исключались из обзора, если они только упоминали показатель без формального определения или формулы для расчета.

Для анализа материалов, посвященных показателям риска, были сформированы три группы источников.

Первую группу составили нормативно-методические и научно-методические документы международных научных организаций и национальных органов, регламентирующих радиационную защиту, оценку радиационного ущерба и оценку рисков при медицинском облучении [8–11, 14–20], а также МР 2.6.1.0098-15³ и МР 2.6.1.0215-20.

Вторую группу составили публикации, в которых вводились, формализовывались или сопоставлялись показатели пожизненного риска. При анализе использовались источники, определяющие расчет таких показателей риска, как excess lifetime risk (ELR; избыточный пожизненный риск), lifetime attributable risk (LAR; пожизненный атрибутивный риск), risk of untimely death (RUD; риск преждевременной смерти), lifetime risk of exposure-induced death (LRED; пожизненный риск смерти, индуцированной воздействием), risk of

³ Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований: Методические рекомендации МР 2.6.1.0098-15. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 06.04.2015. [Radiation risk assessment for patients undergoing X-ray radiological examinations. Guidelines MR 2.6.1.0098-15. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 06.04.2015. (In Russ.)]

exposure-induced death (REID; риск смерти, индуцированной воздействием), risk of exposure-induced cancer incidence (REIC; риск заболеваемости раком, индуцированной воздействием), loss of life expectancy (LLE; потеря ожидаемой продолжительности жизни), years of life lost (YLL; потерянные годы жизни) и производные от них показатели. Основными источниками для этой группы являлись работы M. Vaeth и D.A. Pierce по ELR и RUD [21], D. Thomas и соавт. по определению и оценке пожизненного ущерба (lifetime detriment) [22], A.M. Kellerer и соавт. по преобразованию excess relative risk (ERR; избыточный относительный риск) в LAR [23], M. Andersson и соавт. по применению LAR в диагностической и терапевтической ядерной медицине [24], а также документы Исследовательского центра по оценке защиты в ядерной области (CEPN), Научного комитета Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации (UNSCEAR) и МКРЗ, в которых эти показатели соотношены с LRED/REID, LLE, YLL и радиационным ущербом [8, 10, 18].

Третью группу составили современные публикации и руководства, в которых радиационный риск рассматривается в клиническом, коммуникационном или межфакторном контексте. В эту группу были включены работы с использованием DALY (числа потерянных лет здоровой жизни) как показателя радиационного риска [25], обсуждением DALY и иных интегральных показателей как возможного дополнения к radiation detriment (радиационному ущербу) [26], сопоставлению радиационных и химических рисков в единой шкале DALY [27], применению DALY при обосновании медицинского облучения [3], межпопуляционному сравнению пожизненных радиационных рисков и DALY [4, 5], а также материалы по риск-коммуникации [28].

Для формирования качественной шкалы уровней радиационного риска, связанного с проведением РПП, использовались методические рекомендации МР 2.6.1.0098-15, МР 2.6.1.0215-20, публикации МКРЗ [8, 17, 18, 29, 30], Агентства по охране окружающей среды США (EPA) [11], Национального совета по радиационной защите и измерениям США (NCRP) [20], а также источники из смежных областей оценки медицинского риска и риска для здоровья при воздействии факторов риска, отличных от ИИ. Для гармонизации терминологии и границ числовых диапазонов риска было

проанализировано руководство по оценке канцерогенного риска при воздействии химических веществ⁴ и иные научные публикации [28, 31–34]. Выбранный подход обусловлен тем, что диагностические РПП связаны не только с радиационным риском развития стохастических эффектов, но и с иными рисками медицинского вмешательства: аллергическими и физиологическими реакциями на контрастные вещества, осложнениями при выполнении инвазивных или интервенционных процедур, рисками при проведении седации и анестезии, а также рисками, связанными с отказом от исследования, отсрочкой диагностики и ложноположительными или ложноотрицательными результатами, которые должны обсуждаться в рамках сопоставления пользы и возможного вреда.

Результаты и обсуждение

Выполнение медицинских РПП может быть связано с решением различных прикладных задач в области анализа рисков:

1. Обоснование метода исследования: сравнительный анализ выгод и рисков, связанных с применением метода диагностики при различных патологических состояниях.

2. Информирование пациентов и их законных представителей о возможном риске, связанном с применением методов лучевой диагностики.

3. Оценка последствий радиационной аварии или непреднамеренного медицинского облучения.

4. Оценка популяционных рисков от медицинского облучения в системе радиационно-гигиенической паспортизации.

5. Обоснование целесообразности и оценка эффективности проведения мероприятий по оптимизации радиационной защиты пациентов с использованием риск-ориентированных подходов.

В настоящее время используется несколько групп интегральных показателей риска, различающихся по смыслу, области применения и степени методологической строгости. Для целей статьи они были объединены в три группы: показатели, основанные на числе случаев ЗНО или смертей; показатели, выражающие вред в потерянных годах жизни или здоровой жизни; интегральные показатели радиационного ущерба. Сводная характеристика показателей приведена в таблице 1.

Таблица 1. Сводная характеристика показателей радиационного риска

[Table 1. Summary of radiation risk indicator characteristics]

Аббревиатура [Abbreviation]	Английское название [English term]	Русскоязычный эквивалент [Equivalent in Russian]	Смысл показателя [Meaning of the indicator]	Источники [Sources]
ELR	Excess lifetime risk	Избыточный пожизненный риск	Разность пожизненных рисков негативного исхода в облученной и сопоставимой необлученной популяции [The difference in lifetime risks of an negative outcome between an exposed population and a comparable unexposed population.]	[21, 22]
ECI / ECD	Excess cancer incidence / excess cancer deaths	Избыточная онкологическая заболеваемость / избыточная онкологическая смертность	Исход-специфические варианты ELR для заболеваемости раком и смертности от рака. [Outcome-specific variants of ELR for cancer incidence and cancer mortality.]	[17]

⁴ Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания. Р 2.1.10.3968-23. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023. [Guidelines for Human Health Risk Assessment of Chemical Contaminants in the Environment. R 2.1.10.3968-23. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being; 2023. (In Russ.)]

Аббревиатура [Abbreviation]	Английское название [English term]	Русскоязычный эквивалент [Equivalent in Russian]	Смысл показателя [Meaning of the indicator]	Источники [Sources]
RUD	Risk of untimely death	Риск преждевременной смерти	Ранний термин для риска смерти, наступившей раньше вследствие воздействия; по смыслу близок к LAR для смертности. [An early term for the risk of death occurring earlier as a result of exposure; similar in meaning to LAR for mortality.]	[21]
LAR	Lifetime attributable risk	Пожизненный атрибутивный риск	Пожизненный риск исхода, приписанного воздействию, включая «ускоренные» случаи ЗНО или смерти; обычно использует функцию дожития для необлученной популяции. [Lifetime risk of an outcome attributed to exposure, including “accelerated” cancer cases or deaths; typically uses the survival function of the unexposed population.]	[23, 24]
REIC / REID	Risk of exposure-induced cancer incidence / risk of exposure-induced death	Риск радиационно-индуцированной заболеваемости раком / риск смерти, индуцированной воздействием	Показатели риска учитывают изменение функции дожития в облученной популяции [Risk indicators account for changes in the survival function of the exposed population.].	[8, 22]
YLL / YLD	Years of life lost / years lived with disability	Потерянные годы жизни / годы жизни с ухудшением здоровья	Компоненты оценки бремени болезни: преждевременная смертность и годы жизни в состоянии неполного здоровья. [Components of burden of disease assessment: premature mortality and years lived with disability]	[35]
LLE / YLLRIC	Loss of life expectancy / years of life lost per radiation-induced cancer	Потеря ожидаемой продолжительности жизни / годы жизни, теряемые при радиационно-индуцированном раке	Показатели тяжести последствий в годах жизни; YLLRIC выражает среднюю потерю лет на одну радиационно-индуцированную смерть. [Indicators of consequence severity in life-years lost; YLLRIC expresses the average life-years lost per radiation-induced death.]	[26]
DALY	Disability-adjusted life year	Годы жизни, скорректированные по нетрудоспособности; потерянные годы здоровой жизни	Интегральный показатель бремени болезни: DALY = YLL + YLD; пригоден для сопоставления радиационного вреда с иными факторами риска. [Integrated burden of disease indicator: DALY = YLL + YLD; suitable for comparing radiation harm with other risk factors.]	[25, 27, 34]
Radiation detriment	Radiation detriment	Радиационный ущерб	Интегральный показатель МКРЗ, учитывающий вероятность и тяжесть стохастических эффектов для номинальной популяции. [ICRP integrated indicator accounting for the probability and severity of stochastic effects in a nominal population.]	[8, 16]
DAR	Detriment-adjusted risk	Риск, взвешенный с учетом ущерба	Аналог радиационного ущерба, рассчитываемый с использованием современных медико-демографических данных и коэффициентов относительного вреда для конкретной популяции. [An analogue of radiation detriment, calculated using current medical and demographic data and population-specific relative harm coefficients.]	МР 2.6.1.0215-20, [8]

Показатели ELR, ECI и ECD отражают чистый прирост пожизненного риска соответствующего исхода в облученной популяции по сравнению с аналогичной необлученной. LAR, RUD, REID и REIC базируются на более сложной концепции: они включают также случаи ЗНО или смерти от ЗНО, которые без облучения могли бы произойти позднее, но вследствие облучения произошли раньше. Различие между LAR и REIC/REID состоит главным образом в используемой функции дожития: LAR обычно использует нормальную, не измененную воздействием, функцию дожития, тогда как REIC и REID используют

функцию дожития или функцию жизни без рака, измененную воздействием [8, 22, 23].

Показатели LLE, YLL, YLD, YLLRIC и DALY позволяют перейти от выражения риска в вероятностях или числе случаев к выражению вреда в потерянных годах жизни или здоровой жизни. Это особенно важно при популяционных оценках малых индивидуальных доз, когда пересчет коллективной дозы в ожидаемое число смертей может создавать неоправданно натурализованное представление о масштабе риска [10, 16, 25, 35].

В связи с тем, что в поле облучения при выполнении медицинской РПП могут попасть различные органы, ткани и системы организма, подробное описание риска всех возможных негативных последствий облучения стало бы слишком громоздким и при этом лишенным практического смысла. Поэтому при решении многих прикладных задач для характеристики радиационных рисков, связанных с медицинским облучением, гораздо эффективнее пользоваться обобщенными показателями, т.е. количественными и/или качественными показателями, которые отражают совокупный вред для здоровья, обусловленный облучением, без его раздельного описания применительно к отдельным органам, тканям, системам организма, нозологическим формам и возможным исходам.

При этом чем меньшее число обобщенных показателей используется для характеристики риска, тем менее детальное представление о масштабе и характере возможных последствий они дают. Поэтому при выборе базового перечня показателей для использования в контексте медицинского облучения учитывались три вида возможных негативных последствий вредного воздействия на здоровье: количество или частота негативных исходов (рисков развития смертельных и несмертельных заболеваний); длительность негативных состояний (заболеваний); тяжесть негативных состояний (заболеваний и инвалидностей). Формируемый перечень показателей должен позволять при необходимости описывать все три указанные характеристики, но не создавать неоправданную сложность в ситуациях, когда подобная детализация не влияет на принятие решений.

Из приведенного выше перечня для характеристики радиационных рисков в настоящей работе были выбраны пять показателей: эффективная доза, радиационный ущерб, DAR, DALY и характеристика риска в соответствии с качественной шкалой уровней риска. Выбор указанных показателей обусловлен следующими соображениями:

1. Эффективная доза – мера риска возникновения отдаленных последствий облучения организма человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности¹. Указанная величина с момента ее внедрения в практику более чем 35 лет назад хорошо знакома специалистам в области радиационной защиты и позволяет быстро сопоставлять возможные риски с повседневным уровнем облучения граждан от воздействия природных и иных источников ИИ. Эффективная доза, как мера риска, зачастую вычисляется при проведении исследования и сообщается пациентам.

2. Эффективная доза сама по себе не является показателем риска, но с ее помощью вычисляется значение радиационного ущерба, который позволяет грубо оценить порядок величины радиационного риска [8, 15].

3. Качественная шкала риска, как инструмент для наиболее грубой оценки риска, удобна в ситуациях, когда отсутствует необходимость использования точного значения риска, и достаточно указать диапазон рисков или даже просто название диапазона.

4. Показатель DAR рассчитывается с использованием REIC и наиболее математически строго позволяет учесть влияние популяционной принадлежности, пола и возраста пациента на величину риска. В отличие от показателей ELR, ECI и ECD, указанный показатель учитывает не только такие негативные исходы, которые полностью вызваны воздействием радиации, но и такие, которые произошли бы с человеком по иным причинам, но наступят раньше вследствие воздействия ИИ. В отличие от показателей LAR и RUD, расчет значений DAR происходит с использованием функции дожития, скорректированной для облученной популяции. Наконец, показатель DAR напрямую математически сопоставим с радиационным ущербом, в отличие от REIC и REID. Таким образом, DAR является наиболее математически строгой и информативной метрикой радиационного риска из применяемых в настоящее время в области управления рисками, если негативные последствия необходимо выразить, оценивая число случаев негативного исхода (заболеваний или смертей).

5. Показатель DALY – наиболее современный обобщенный показатель популяционного здоровья, применяемый для оценки бремени болезней, а в последние годы все чаще применяемый для оценки риска для здоровья в связи с воздействием вредных факторов среды обитания. DALY, в отличие от LLE и YLLRIC, позволяет существенно более методически строго оценить вклад несмертельных заболеваний в общий радиационный вред для здоровья, что приобретает особую важность в связи с успехами в лечении рака и общим улучшением качества медицинской помощи. Время, проведенное в состоянии неполного здоровья, учитывается по универсальной методике, в отличие от того, как учитывается вклад несмертельных заболеваний при оценке радиационного ущерба [24, 26, 34].

Качественная шкала уровней радиационного риска (табл. 2) была сформирована как адаптированная гибридная шкала, предназначенная для описания величины индивидуального пожизненного дополнительного риска, связанного с выполнением РПП. Основой для формирования шкалы послужили МР 2.6.1.0098-15 и МР 2.6.1.0215-20. Шкала оценки химического канцерогенного риска из руководства Р 2.1.10.3968-23 использовалась для гармонизации границ диапазонов риска.

В отличие от МР 2.6.1.0098-15, для диапазона $3 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$ предложено использовать термин «повышенный» вместо «существенный». Такая замена является терминологической адаптацией для клинического контекста: она описывает величину риска, но не создает впечатления автоматической недопустимости процедуры. Дополнительно шкала была расширена выше 1×10^{-2} , что необходимо для единообразного описания редких ситуаций повторных высокодозовых процедур, сложных интервенционных вмешательств или аварийного (нештатного) облучения.

Таблица 2. Сопоставление предлагаемой шкалы с существующими шкалами риска
[Table 2. Comparison of the proposed scale with existing risk scales]

Диапазон пожизненного риска R [Lifetime risk range R]	Предлагаемая шкала [Proposed Scale]	МР 2.6.1.0098-15	МР 2.6.1.0215-20	ICRP 62	Р 2.1.10.1920-04 Р 2.1.10.3968-23
$R < 10^{-6}$	Пренебрежимый [Negligible]	Пренебрежимый [Negligible]	Пренебрежимо малый [De minimis risk]	Category I / trivial	De minimis / минимальный [De minimis / Minimal]
$10^{-6} \leq R < 10^{-5}$	Минимальный [Minimal]	Минимальный [Minimal]	Минимальный [Minimal]	Category IIa	Допустимый / приемлемый [Tolerable / Acceptable]

Диапазон пожизненного риска R [Lifetime risk range R]	Предлагаемая шкала [Proposed Scale]	MP 2.6.1.0098-15	MP 2.6.1.0215-20	ICRP 62	P 2.1.10.1920-04 P 2.1.10.3968-23
$10^{-5} \leq R < 10^{-4}$	Очень низкий [Very low]	Очень низкий [Very low]	Очень низкий [Very low]	Category IIb	Допустимый / приемлемый [Tolerable / Acceptable]
$10^{-4} \leq R < 10^{-3}$	Низкий [Low]	Низкий [Low]	Низкий [Low]	–	Настораживающий [Alert]
$10^{-3} \leq R < 3 \times 10^{-3}$	Умеренный [Moderate]	Умеренный [Moderate]	Умеренный [Moderate]	Category III	Высокий (неприемлемый для факторов среды обитания) [High (unacceptable for environmental factors)]
$10^{-3} \leq R < 10^{-2}$		– *	–	–	
$3 \times 10^{-3} \leq R < 10^{-2}$		Существенный [Substantial]	–	–	
$10^{-2} \leq R < 10^{-1}$	Повышенный [Elevated]	–	–	Category III	
$R \geq 10^{-1}$	Высокий [High]	–	–	–	–

* Данная специфическая категория в источнике отсутствует. [This specific category is not included in the source.]

Выбор одного или нескольких показателей для характеристики рисков зависит от дозы облучения, доступности половозрастных и дозиметрических данных, масштаба оценки и адресата результата. В настоящей работе предложен следующий порядок выбора показателей.

1. Для нижнего уровня качественной шкалы риска в настоящей работе был обоснован выбор консервативной дозовой границы, выраженной через эффективную дозу. Базовый расчет выполнен по номинальному коэффициенту радиационного ущерба для всего населения из Публикации 103 МКРЗ [16]: $k = 5,7 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ [6]. При условии $R < 10^{-6}$ и $R = k \times E$ (где R – радиационный ущерб, безразмерная величина, k – коэффициент номинального радиационного ущерба, Зв^{-1} , E – эффективная доза, Зв) получаем значение эффективной дозы E_0 , соответствующее данному уровню риска: $E_0 = R / k = 10^{-6} / (5,7 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}) = 1,75 \times 10^{-5} \text{ Зв} = 0,0175 \text{ мЗв} = 17,5 \text{ мкЗв}$. Однако данная оценка не является возраст-специфической. С учетом более высокой радиочувствительности детей, возможного наличия чувствительных групп и особенностей восприятия риска пациентами и законными представителями для целей настоящей методики нижняя граница эффективной дозы $E_{\text{мет}}$ была дополнительно снижена примерно на порядок: $E_{\text{мет}} = E_0 / 10 = 1,75 \text{ мкЗв} \approx 2 \text{ мкЗв}$. Следовательно, при $E \leq 2 \text{ мкЗв}$ оценка радиационного ущерба по номинальному коэффициенту из Публикации 103 МКРЗ составляет $R = 5,7 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1} \times 2 \times 10^{-6} \text{ Зв} = 1,14 \times 10^{-7}$, то есть остается ниже 1×10^{-6} с запасом примерно в 8,8 раза. Данный результат хорошо соотносится с требованиями п. 1.4 НРБ-99/2009⁵, предусматривающими исключение из-под регулирующего контроля источников, ассоциированных с индивидуальной годовой эффективной дозой менее

10 мкЗв. Для РРП с эффективной дозой менее 2 мкЗв за процедуру проводить отдельную оценку радиационного риска нецелесообразно; для характеристики риска достаточно указать эффективную дозу и качественную категорию риска.

2. При процедурах с эффективной дозой в диапазоне 0,002–0,1 мЗв, основными показателями остаются эффективная доза и качественная шкала; DAR рассчитывается только для лиц с повышенной радиочувствительностью (беременных женщин и детей).

3. При процедурах с эффективной дозой порядка 0,1–1 мЗв и выше, при сериях РРП, проведении процедур КТ, радионуклидной диагностике и интервенционных РРП предпочтительно использовать DAR для индивидуальной или групповой оценки риска.

4. При решении задач на популяционном уровне, где индивидуальные дозы недоступны, средние индивидуальные дозы малы, а численность экспонированных лиц велика, расчет ожидаемого числа радиационно-индуцированных смертей или случаев заболевания рассматривался как методически нежелательный. Это согласуется с рекомендациями МКРЗ: коллективная эффективная доза не предназначена для эпидемиологической оценки риска, и следует избегать расчета числа случаев рака или смертей на основе коллективных эффективных доз при тривиальных индивидуальных дозах и больших популяциях [15]. Для таких популяционных ситуаций более предпочтительным считается использование показателей, выражающих вред не в ожидаемом числе случаев или смертей, а в потерянных годах здоровой жизни, прежде всего DALY [4, 24, 26, 34]. При этом возможно сопоставление радиационного вреда с вредом от химических, медицинских и иных факторов.

⁵ 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.)]

При возникновении ситуации аварийного облучения пациента или проведении РРП, ассоциированных с эффективной дозой выше 100 мЗв, требуется детальный анализ риска на основе поглощенных доз в органах и тканях, пола и возраста пациента, параметров процедуры и выбранной модели радиационного риска. Детальный анализ риска в данном контексте означает не простое умножение эффективной дозы на номинальный коэффициент ущерба, а расчет органных доз, выбор половозрастной модели риска, оценку пожизненного риска для отдельных локализаций или групп ЗНО, а затем, при необходимости, агрегирование результата в DAR, DALY или иной обобщенный показатель. Выполнять такую оценку должны специалисты, имеющие подготовку в области радиационной гигиены, медицинской физики, дозиметрии или радиационной эпидемиологии, совместно с клиническими специалистами, отвечающими за обоснование процедуры и интерпретацию ее пользы.

При решении практических задач выбор показателя риска является не только технической операцией. Один и тот же расчетный результат может по-разному влиять на решение в зависимости от того, представлен он как доза, вероятность заболевания, риск смерти, качественная категория или потерянные годы здоровой жизни. Поэтому форма представления риска должна соответствовать цели оценки, адресату информации, величине дозы и доступности исходных данных. При обсуждении медицинской процедуры риск необходимо рассматривать вместе с диагностической пользой, альтернативами и последствиями отказа или отсрочки исследования [29].

При информировании пациентов и их законных представителей важно избегать двух крайностей: излишней натурализации малых вероятностей, когда очень малый расчетный риск описывается только как риск «смерти от рака», и чрезмерного сглаживания риска, когда вероятностный вред переводится в малую среднюю потерю времени жизни на одного обследованного. В обоих случаях математически корректная величина может быть коммуникативно неполной, если не объяснены ее смысл, неопределенности и клинический контекст.

Для чувствительных групп, прежде всего родителей маленьких детей, формального указания порядка вероятности недостаточно. Риск порядка 10^{-6} или 10^{-5} специалист обычно воспринимает как крайне малый, тогда как пациент или родитель может воспринимать не порядок величины, а саму возможность неблагоприятного исхода. Поэтому качественную категорию риска целесообразно сопровождать абсолютной вероятностью или натуральной частотой, например «менее 1 случая ЗНО на миллион обследованных» или «примерно 1 случай ЗНО на 100 000 обследованных», одновременно указывая ожидаемую пользу процедуры и возможные альтернативы [32, 33].

Показатели, выраженные в годах жизни, требуют отдельного пояснения. Если для группы рассчитано значение 10 DALY, это не означает фактическое равномерное сокращение жизни всех обследованных на малую долю времени. Такой результат является математическим ожиданием суммарного популяционного бремени; реальные потери, если

радиационно-индуцированные исходы возникнут, будут сосредоточены у небольшой части лиц. Поэтому формулировки вида «в среднем каждый пациент потеряет несколько минут жизни» без пояснения вероятностной природы показателя могут быть методически и этически некорректны.

Эффективная доза в настоящем подходе рассматривается как мера риска, но не как самостоятельный показатель индивидуального риска. Она удобна для специалистов при первичном описании радиационной нагрузки, сравнении процедур и оптимизации протоколов, а также необходима как понятная исходная величина при информировании пациента. Однако эффективная доза не должна представляться как точная индивидуальная вероятность вреда, поскольку рассчитывается для референтного человека и использует усредненные тканевые взвешивающие множители [16, 30].

Радиационный ущерб позволяет оценить порядок величины стохастического вреда в логике радиационной защиты и, при необходимости, отнести риск к качественной категории. Его основное назначение – грубая групповая или управленческая оценка риска в диапазоне малых доз. Поскольку радиационный ущерб рассчитывается для номинальной популяции, он не является оптимальным средством персонализированной коммуникации с конкретным пациентом [8, 26].

Качественная шкала риска предназначена для описания уровня возможных последствий без необходимости детального анализа числовых значений показателей риска. Она особенно полезна для низкодозовых процедур, предварительного сравнения вариантов исследования и коммуникации с пациентами. При этом качественная категория не является критерием допустимости или недопустимости РРП: решение о выполнении процедуры определяется соотношением пользы и риска в конкретной клинической ситуации.

DAR следует использовать в тех случаях, когда требуется оценить риск с учетом пола, возраста и медико-демографических характеристик конкретной популяции. В практическом смысле этот показатель позволяет представить стохастический риск в терминах риска развития смертельного заболевания с поправкой на тяжесть последствий. Поэтому DAR целесообразен для оценки риска у детей и молодых пациентов, при повторных исследованиях, сравнении протоколов для конкретных половозрастных групп и анализе нештатного облучения.

DALY дает представление о характере и размере возможных популяционных потерь, поскольку объединяет преждевременную смертность и годы жизни с ухудшением здоровья. Он наиболее удобен при анализе риска для массовых РРП, программ обследования, радиационно-гигиенической паспортизации и межфакторных сравнений, например при сопоставлении радиационного вреда с вредом от химических факторов, реакций на контрастные вещества, осложнений вмешательства или последствий отказа от диагностики [3, 4, 24].

Практическое применение выбранных показателей целесообразно строить не по принципу универсального «лучшего» показателя, а по принципу соответствия показателя задаче (табл. 3). В большинстве ситуаций достаточно сочетать один количественный показатель для специалиста и одну качественную интерпретацию для пациента или лица, принимающего решение.

Таблица 3. Предпочтительные показатели риска для основных практических задач

[Table 3. Preferred risk indicators for major practical tasks]

Ситуация / задача [Situation / Task]	Основной показатель [Primary Indicator]	Дополнительные показатели [Additional Indicators]	Комментарий к применению [Comment on Application]
Низкодозовая диагностическая процедура [Low-dose diagnostic procedure]	Эффективная доза; качественная шкала [Effective dose; qualitative scale]	DAR при необходимости индивидуального пояснения [DAR when individual explanation is needed]	Достаточно простого описания уровня риска; расчет ожидаемых смертей нецелесообразен. [A simple description of the risk level is sufficient; calculating expected deaths is not appropriate.]

Ситуация / задача [Situation / Task]	Основной показатель [Primary Indicator]	Дополнительные показатели [Additional Indicators]	Комментарий к применению [Comment on Application]
Информирование пациента или родителей ребенка [Informing a patient or a child's parent]	Качественная шкала риска [Qualitative risk scale]	DAR в натуральных частотах; эффективная доза [DAR in natural frequencies; effective dose]	Сообщение должно включать пользу, альтернативы и риск отказа или отсрочки диагностики. [The communication should include benefit, alternatives, and the risk of refusal or delay of diagnosis.]
Сравнение протоколов или методов визуализации [Comparison of protocols or imaging methods]	Эффективная доза; DAR [Effective dose; DAR]	DALY при групповом анализе [DALY for group-level analysis]	Эффективная доза описывает нагрузку, DAR учитывает популяционную структуру пациентов. [Effective dose describes the burden; DAR accounts for the age- and sex-specific structure of the patient population.]
Дети и беременные женщины [Children and pregnant women]	DAR	Качественная шкала; DALY при групповом анализе [Qualitative scale; DALY for group-level analysis]	Возраст и ожидаемая продолжительность жизни существенно влияют на пожизненный риск. [Age and life expectancy significantly influence lifetime risk.]
Ситуация аварийного облучения пациента [Patient emergency exposure situation]	DAR; расчет по органным дозам [DAR; organ-dose-based calculation]	DALY; качественная шкала; оценка тканевых реакций при соответствующих дозах [DALY; qualitative scale; assessment of tissue reactions at relevant doses]	Требуется восстановление условий облучения и расчет органых или тканевых доз. [Reconstruction of exposure conditions and calculation of organ or tissue doses are required.]
Популяционная оценка, массовые программы, паспортизация [Population-based assessment, mass screening programs, radiation certification]	Эффективная доза; радиационный ущерб; DALY [Effective dose; radiation detriment; DALY]	Качественная шкала для краткого представления [Qualitative scale for concise presentation]	При очень малых индивидуальных дозах нежелательно переводить коллективную дозу в число смертей. [When individual doses are very small, converting collective dose into the number of deaths is discouraged.]
Сопоставление с нерадикационными рисками [Comparison with non-radiation risks]	DALY	DAR; качественная шкала [DAR; qualitative scale]	Позволяет сравнивать последствия разной природы в общей единице бремени здоровья. [Allows comparison of consequences of different natures using a common unit of health burden.]

Заключение

Оценка риска представляет собой начальный этап стандартной схемы анализа риска, предваряющий управление риском и информирование о риске. Оценка радиационного риска является инструментом информационной поддержки принятия управленческих решений в условиях неопределенности точной оценки возможных последствий негативного воздействия ИИ на здоровье. Принятие управленческих решений о радиационных рисках в зависимости от характера и масштаба возможных негативных последствий радиационного воздействия требует наличия информации о рисках, собирающейся на последнем этапе оценки – характеристике рисков. Степень детализации информации о рисках определяется, в частности, выбранными показателями

количественной и качественной оценки.

Выбор показателей радиационного риска для представления результатов оценки риска должен соответствовать цели оценки и учитывать целевую аудиторию, для которой предназначена информация о риске: медицинские работники, пациенты и их законные представители, управленческий персонал и сотрудники надзорных органов. Обобщенные показатели риска различаются по сложности и информативности. Для РРП с очень малыми дозами зачастую достаточно ограничиться качественной оценкой риска и эффективной дозой как мерой риска, тогда как при высокодозовых процедурах, повторных исследованиях или нештатном облучении может потребоваться детальный анализ рисков с учетом органых доз, пола, возраста и медико-демографических характеристик популяции.

Предложенная схема выбора показателей риска охватывает большинство типичных ситуаций медицинского диагностического облучения и позволяет согласовать форму представления риска с задачей оценки. Эффективная доза удобна как мера риска и дозовой нагрузки; радиационный ущерб позволяет оценить порядок величины риска и выполнить его качественную классификацию; качественная шкала облегчает интерпретацию уровня риска без детального анализа числовых значений; DAR предназначен для оценки риска с учетом пола, возраста и популяционных характеристик; DALY позволяет представить характер и размер популяционных потерь и удобен при анализе массовых РПП и межфакторных сопоставлениях.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин Л.В. разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, написал черновик рукописи.

Библин А.М. провел поиск и анализ литературных данных, редактировал промежуточный вариант рукописи, подготовил окончательный вариант рукописи.

Водоватов А.В. провел поиск и анализ литературных данных, редактировал промежуточный вариант рукописи, подготовил окончательный вариант рукописи.

Ахматдинов Р.Р. провел поиск и анализ литературных данных, создал иллюстрацию, 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 практических подходов к оценке радиационных рисков и риск-коммуникации в ситуациях медицинского, природного и техногенного облучения».

Литература

1. Репин Л.В., Чипига Л.А., Библин А.М. и др. Характеристика радиационного риска, связанного с проведением радионуклидной диагностики для российских пациентов путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2024. Т. 14, № 4. С. 189–203. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-4-189-203.
2. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М. и др. Характеристика радиационного риска от рентгеноскопических исследований путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 7–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17.
3. Kotre C.J. Comparing benefit and detriment from medical diagnostic radiation exposure using disability-adjusted life years: towards quantitative justification // Journal of Radiological Protection. 2023. Vol. 43, No. 4. Article 04512. DOI: 10.1088/1361-6498/ad1159.
4. Hirouchi J., Kujiraoka I., Takahara S. et al. Comparison of lifetime mortality risk, incidence risk, and DALYs of baseline cancer rates among countries as a benchmark for radiation-related cancer risk // Journal of Radiological Protection. 2024. Vol. 44, No. 2. Article 021510. DOI: 10.1088/1361-6498/ad4043.
5. Hirouchi J., Kujiraoka I., Takahara S. et al. Comparison of radiation-related cancer risk against baseline cancer rates in 33 countries using disability-adjusted life years (DALYs), lifetime incidence risk and lifetime mortality risks // Journal of Radiological Protection. 2025. Vol. 45, No. 1. Article 011508. DOI: 10.1088/1361-6498/adba6f.
6. Репин Л.В., Библин А.М. Разработка мобильного приложения для оценки радиационного риска, связанного с проведением медицинских рентгенорадиологических исследований // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 3. С. 112–119. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-3-112-119.
7. Онищенко Г.Г., Зайцева Н. В., Попова А.Ю. и др. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография: в 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Пермь, 2024. Т. 1. 580 с.
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152 // Annals of the ICRP. 2022. Vol. 51, No. 3. p.103.
9. National Research Council. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC: The National Academies Press, 2006. 424 p.
10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I. New York: United Nations, 2008. 383 p.
11. U.S. Environmental Protection Agency. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. EPA 402-R-11-001. Washington, DC: EPA, 2011. 164 p.
12. Lee C., Kim K.P., Bolch W.E. et al. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, No. 4. P. 891–909. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/891.
13. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. GEANT4 — a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2003. Vol. 506, No. 3. P. 250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
14. Salvat F. PENELOPE-2014: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2015. 386 p.
15. ICRP. Radiological Protection in Biomedical Research. ICRP Publication 62 // Annals of the ICRP. 1992. Vol. 22, No. 3. p. 73.
16. ICRP. 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. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.
17. Advisory Group on Ionising Radiation. Risk of Solid Cancers following Radiation Exposure: Estimates for the UK Population. Documents of the Health Protection Agency. Radiation, Chemical and Environmental Hazards. RCE-19. Chilton: Health Protection Agency, 2011. 258 p.
18. Measures of lifetime detriment from radiation exposures: principles and methods. CEPN Report No. 175. Paris: Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire, 1990.
19. McElvenny D.M. ASQRAD // Journal of Radiological Protection. 1997. Vol. 17, No. 3. P. 223–228.
20. National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. Bethesda, MD: NCRP, 2010. 325 p.
21. Vaeth M., Pierce D.A. Calculating excess lifetime risk in relative risk models // Environmental Health Perspectives. 1990. Vol. 87. P. 83–94. DOI: 10.1289/ehp.908783.
22. Thomas D., Darby S., Fagnani F. et al. Definition and estimation of lifetime detriment from radiation exposures: Principles and methods // Health Physics. 1992. Vol. 63, No. 3. P. 259–272. DOI: 10.1097/00004032-199209000-00001.
23. Kellerer A.M., Nekolla E.A., Walsh L. On the conversion of solid cancer excess relative risk into lifetime attributable risk // Radiation and Environmental Biophysics. 2001. Vol. 40, No. 4. P. 249–257. DOI: 10.1007/s004110100106.
24. Andersson M., Eckerman K., Mattsson S. Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine // Physics in Medicine and Biology. 2017. Vol. 62, No. 24. P. 9177–9188. DOI: 10.1088/1361-6560/aa959c.

25. Shimada K., Kai M. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, No. 4. P. 763–775. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/763.
26. Clement C., Rühm W., Harrison J.D. et al. Keeping the ICRP recommendations fit for purpose // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, No. 4. P. 1390. DOI: 10.1088/1361-6498/ac1611.
27. Vaillant L., Maitre M., Lafranque E. et al. Proposal of a quantitative approach integrating radioactive and chemical risks // Radioprotection. 2023. Vol. 58, No. 2. P. 147–155. DOI: 10.1051/radiopro/2023012.
28. World Health Organization. Communicating radiation risks in paediatric imaging: information to support health care discussions about benefit and risk. Geneva: World Health Organization, 2016. 88 p.
29. ICRP Publication 147: Use of Dose Quantities in Radiological Protection // Annals of the ICRP. 2021. Vol. 50, No. 1. P. 9–82.
30. Martin C.J. Effective dose in medicine // Annals of the ICRP. 2020. Vol. 49, No. 1_suppl. P. 126–142. DOI: 10.1177/0146645320927849.
31. American College of Radiology. ACR Appropriateness Criteria Radiation Dose Assessment Introduction. Reston, VA: American College of Radiology, 2020.
32. National Cancer Institute. Common Terminology Criteria for Adverse Events (CTCAE). Version 6.0. Bethesda, MD: National Cancer Institute, 2025. 312 p.
33. Royal College of Anaesthetists. Anaesthesia and risk: communicating risk to patients. London: Royal College of Anaesthetists, 2019.
34. National Institute for Health and Care Excellence. Shared decision making. NICE guideline NG197. London: NICE, 2021.
35. World Health Organization. WHO methods and data sources for global burden of disease estimates 2000–2021. Geneva: World Health Organization, 2024. 47 p.

Поступила: 15.04.2026

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: l.repin@niirg.ru; ORCID: 0000-0002-4857-6792, РИНЦ Author ID: 653792

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, РИНЦ Author ID: 698045

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-5191-7535, РИНЦ Author ID: 859255

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, РИНЦ Author ID: 1114459

Для цитирования: Репин Л.В., Библин А.М., Водоватов А.В., Ахматдинов Р.Р. Применение различных показателей радиационного риска для здоровья при медицинском облучении // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 95–106. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-95-106

Application of different radiation health risk metrics in medical exposure

Leonid V. Repin¹, Artem M. Biblin¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Rustam R. Akhmatdinov¹

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

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

In recent years, several methodological documents have been approved and a number of scientific articles have been published concerning the assessment of radiation risks associated with medical exposure. Risk

Leonid V. Repin

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

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

assessment is performed using various quantitative and qualitative risk indicators; however, the issue of their correct application, taking into account the specifics of a particular exposure scenario for solving applied problems in risk management, often remains unresolved. The aim of this study is to develop a framework and to substantiate a method for selecting and applying radiation risk indicators associated with diagnostic medical X-ray and radiological procedures, depending on the purpose of risk assessment, the type and parameters of the procedure, patient sex and age, and other factors. **Materials and Methods:** An analysis of radiation risk indicators was carried out based on a literature review, comparative analysis of definitions, and calculation methods. **Results and Discussion:** The main radiation risk indicators and their scope of application were analyzed; a list of indicators recommended for solving applied problems in medical diagnostic exposure was substantiated; a qualitative risk level scale and a scheme for selecting indicators are proposed. **Conclusion:** The developed approach allows for the alignment of the choice of risk indicator with the assessment purpose, target audience, dose burden, and availability of initial data.

Key words: radiation risk, radiation detriment, medical exposure, risk assessment, stochastic effects, low doses.

Authors' personal contribution

Repin L.V. developed design of the study, determined aims and objectives, prepared draft of the manuscript.

Biblin A.M. searched and analyzed literature data, edited the draft versions of the manuscript, presented the final version of manuscript for submission.

Vodovатов A.V. searched and analyzed literature data, edited the draft versions of the manuscript, presented the final version of manuscript for submission.

Akhmatdinov R.R. searched and analyzed literature data, created figure, edited the draft of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was performed within framework of research project "Development and scientific rationale for practical approaches to radiation risk assessment and risk communication in medical, natural, and technogenic exposure scenarios".

References

1. Repin LV, Chipiga LA, Biblin AM, Akhmatdinov RR, Vazhenina DA. Characterization of radiation risk associated with radionuclide diagnostics for the Russian patients using disability-adjusted life years measure. *Rossiyskiy elektronnyy zhurnal luchevoj diagnostiki = Russian Electronic Journal of Radiology*. 2024;14(4): 189–203. (In Russian) DOI:10.21569/2222-7415-2024-14-4-189-203.
2. Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Vodovатов AV, Shatskiy IG. Using disability-adjusted life years measure for characterization of radiation risk from fluoroscopy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 7–17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17.
3. Kotre CJ. Comparing benefit and detriment from medical diagnostic radiation exposure using disability-adjusted life years: towards quantitative justification. *Journal of Radiological Protection*. 2023;43(4): 041512. DOI: 10.1088/1361-6498/ad1159.
4. Hirouchi J, Kujiraoka I, Takahara S, Takada M, Schneider T, Kai M. Comparison of lifetime mortality risk, incidence risk, and DALYs of baseline cancer rates among countries as a benchmark for radiation-related cancer risk. *Journal of Radiological Protection*. 2024;44(2): 021510. DOI: 10.1088/1361-6498/ad4043.
5. Hirouchi J, Kujiraoka I, Takahara S, Takada M, Schneider T, Kai M. Comparison of radiation-related cancer risk against baseline cancer rates in 33 countries using disability-adjusted life years (DALYs), lifetime incidence risk and lifetime mortality risks. *Journal of Radiological Protection*. 2025;45(1): 011508. DOI: 10.1088/1361-6498/adba6f.
6. Repin LV, Biblin AM. Development of a mobile application for assessing radiation risk associated with medical X-ray radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(3): 112–119. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-3-112-119.
7. Onishchenko GG, Zaitseva NV, Popova AY, Mai IV, Ustinova Oyu, Trusov PV et al. Health risk analysis in the strategy of state socio-economic development. Monograph: in 2 volumes. Edited by G.G. Onishchenko and N.V. Zaitseva. 2nd ed., revised and additional. Moscow; Perm; 2024. Vol. 1. 580 p. (In Russian)
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152. *Annals of the ICRP*. 2022;51(3): 103.
9. NAS (National Academy of Sciences). Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR VII - Phase 2). Washington D.C.: National Academy Press; 2006. 424 p.
10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I. New York: United Nations; 2008. 383 p.
11. U.S. Environmental Protection Agency. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. EPA 402-R-11-001. Washington, DC: EPA; 2011. 164 p.
12. Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 891–909. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/891.
13. Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo HM, Arce P, et al. GEANT4 — a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2003;506(3): 250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
14. PENELOPE-2014: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Paris: OECD Nuclear Energy Agency; 2015. 386 p.
15. Radiological Protection in Biomedical Research. ICRP Publication 62. *Annals of the ICRP*. 1992;22(3): 73.
16. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;7(2–4): 332. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.
17. Advisory Group on Ionising Radiation. Risk of Solid Cancers following Radiation Exposure: Estimates for the UK Population. Documents of the Health Protection Agency. Radiation, Chemical and Environmental Hazards. RCE-19. Chilton: Health Protection Agency; 2011. 258 p.
18. Darby S, Fagnani F, Hubert P, Schneider T, Thomas D, Vaeth M, et al. Measures of lifetime detriment from radiation

- exposures: principles and methods. CEPN Report No. 175. Paris: Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire; 1990.
19. McElvenny DM. ASQRAD. *Journal of Radiological Protection*. 1997;17(3): 223–228.
 20. National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. Bethesda, MD: NCRP; 2010. 325 p.
 21. Vaeth M, Pierce DA. Calculating excess lifetime risk in relative risk models. *Environmental Health Perspectives*. 1990;87: 83–94. DOI: 10.1289/ehp.908783.
 22. Thomas D, Darby S, Fagnani F, Hubert P, Vaeth M, Weiss K. Definition and Estimation of Lifetime Detriment from Radiation Exposures. *Health Physics*. 1992;63(3): 259–272. DOI: 10.1097/00004032-199209000-00001.
 23. Kellerer AM, Nekolla EA, Walsh L. On the conversion of solid cancer excess relative risk into lifetime attributable risk. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40(4): 249–257. DOI: 10.1007/s004110100106.
 24. Andersson M, Eckerman K, Mattsson S. Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine. *Physics in Medicine and Biology*. 2017;62(24): 9177–9188. DOI: 10.1088/1361-6560/aa959c.
 25. Shimada K, Kai M. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 763–775. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/763.
 26. Clement C, Rühm W, Harrison JD, Applegate K, Cool D, Larsson CM et al. Keeping the ICRP recommendations fit for purpose. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(4): 1390–1409. DOI: 10.1088/1361-6498/ac1611.
 27. Vaillant L, Maitre M, Lafranque E, Schneider T, Wasselin V. Proposal of a quantitative approach integrating radioactive and chemical risks. *Radioprotection*. 2023;58(2): 147–155. DOI: 10.1051/radiopro/2023012.
 28. World Health Organization. Communicating radiation risks in paediatric imaging: information to support health care discussions about benefit and risk. Geneva: World Health Organization; 2016. 88 p.
 29. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. *Annals of the ICRP*. 2021;50(1): 82.
 30. Martin C. Effective dose in medicine. *Annals of the ICRP*. 2020;49(1_suppl): 126–140. DOI: 10.1177/0146645320927849.
 31. American College of Radiology. ACR Appropriateness Criteria Radiation Dose Assessment Introduction. Reston, VA: American College of Radiology; 2020.
 32. National Cancer Institute. Common Terminology Criteria for Adverse Events (CTCAE). Version 6.0. Bethesda, MD: National Cancer Institute; 2025. 312 p.
 33. Royal College of Anaesthetists. Anaesthesia and risk: communicating risk to patients. London: Royal College of Anaesthetists; 2019.
 34. National Institute for Health and Care Excellence. Shared decision making. NICE guideline NG197. London: NICE; 2021.
 35. World Health Organization. WHO methods and data sources for global burden of disease estimates 2000–2021. Geneva: World Health Organization; 2024. 47 p.

Received: April 15, 2026

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 (8, Mira Str., Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: l.repin@niirg.ru); ORCID: 0000-0002-4857-6792, PIHL Author ID: 653792

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, PIHL Author ID: 698045

Aleksandr V. Vodovатов – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory of Radiation Hygiene of Medical Facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-5191-7535, PIHL Author ID: 859255

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, PIHL Author ID: 1114459

For citation: Repin L.V., Biblin A.M., Vodovатов A.V., Akhmatdinov R.R. Application of different radiation health risk metrics in medical exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 95–106. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-95-106

Сравнительный анализ информированности о радиационной безопасности студентов медицинских вузов и врачей

Водоватов А.В.^{1,2}, Библин А.М.¹, Капырина Ю.Н.², Гусева Р.А.², Пузырев В.Г.², Имамов А.А.³

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

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

³ Казанский государственный медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Казань, Республика Татарстан, Россия

Проблема недостаточной информированности медицинских работников о воздействии ионизирующего излучения и методах радиационной защиты остается актуальной во всем мире. Цель исследования: сравнительный анализ уровня знаний студентов медицинских вузов и практикующих врачей о воздействии ионизирующего излучения на здоровье человека и принципах радиационной защиты по данным отечественных и зарубежных публикаций с последующей разработкой методов его повышения. Материалы и методы: Проведен систематический обзор и качественный анализ данных социологических опросов и научных статей, опубликованных в период с 2009 по 2024 год в России, Польше, Норвегии, Индии, Пакистане, Ирландии, Румынии, Японии, Австралии и Новой Зеландии. Результаты исследования и обсуждение: Студенты медицинских вузов и врачи в большинстве представленных стран демонстрируют фрагментарные знания о дозиметрии, биологических эффектах облучения и методах защиты от ионизирующего излучения. При этом отмечено, что целенаправленное дополнительное обучение по вопросам радиационной безопасности статистически значимо повышает уровень осведомленности и снижает тревожность, тогда как стаж работы сам по себе не является фактором улучшения знаний. Заключение: Практическая значимость работы заключается в обосновании необходимости внедрения специализированных курсов в основные образовательные программы медицинских вузов и организации систематического последипломного обучения по радиационной безопасности; перспективным направлением является разработка дифференцированных образовательных подходов для различных категорий медицинского персонала.

Ключевые слова: информированность, ионизирующее излучение, радиационная безопасность, студенты медицинских вузов, медицинские работники.

Введение

Ионизирующее излучение (ИИ) широко используется в современной медицине для диагностики и для лечения. Вместе с тем ИИ продолжает оставаться одним из факторов риска для здоровья пациентов и медицинского персонала, что делает вопросы радиационной безопасности (РБ) крайне актуальными.

Информированность о воздействии ИИ является критически важным аспектом сохранения общественного здоровья и профессиональной подготовки медицинских кадров во всём мире. Недостаточные знания в данной области могут приводить к необоснованным назначениям рентгено-радиологических процедур и росту увеличению радиационных рисков для пациентов, что также может привести к снижению уровня доверия пациентов к системе здравоохранения, и росту уровня радиотревожности в обществе.

Восприятие рисков, связанных с ИИ, часто основано на эмоциональных и субъективных факторах, а не на научных данных, что ведёт к снижению эффективности терапии и за-

труднению коммуникации между врачом и пациентом. Исследования показывают, что люди склонны переоценивать риски, связанные с воздействием ИИ, и недооценивать риски, связанные с другими факторами, такими как курение или неправильное питание [1]. Это связано с тем, что ИИ воспринимается как невидимая и неконтролируемая угроза, в то время как другие риски кажутся более предсказуемыми и управляемыми.

Современные исследования [2, 3] также подчеркивают необходимость преодоления разрыва между научными данными и восприятием риска различными группами населения, включая медицинских работников, и показывают, что простое повышение уровня информированности без учёта социально-психологических и других факторов часто оказывается недостаточным для формирования адекватных моделей поведения.

В том числе уровень знаний об ИИ значительно варьируется в зависимости от региона, уровня образования и доступа к информации, в том числе по роду профессиональной деятельности [2, 3]. Как показывают исследования [1, 2], специалисты склонны выше оценивать риски от природных

Водоватов Александр Валерьевич

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

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E mail: vodovatoff@gmail.com

источников ИИ и медицинского облучения, тогда как население в большей степени опасается техногенных аварий и негативных последствий ядерной деятельности. Основными источниками информации для населения в данном вопросе продолжают оставаться средства массовой информации (СМИ), и в значительно меньшей степени пациенты обращаются к специализированной информации в научных публикациях и государственных органах здравоохранения [3–6]. СМИ играют ключевую роль в формировании общественного мнения, однако часто предоставляют информацию в упрощённой или сенсационной форме, что может приводить к искажению восприятия [6]. Образовательные программы, напротив, стремятся предоставить объективную и научно обоснованную информацию, но их доступность и качество могут варьировать [6].

Образование и просвещение играют ключевую роль в повышении информированности об ИИ [1, 4, 5, 7]. Программы по обучению РБ, проводимые в школах и университетах, могут значительно повысить уровень знаний и уменьшить страх перед ИИ [5, 7, 8]. На данный момент практически во всех странах существует значительный пробел в знаниях об ИИ как среди студентов, так и среди практикующих врачей.

Цель исследования – сравнительный анализ данных об уровне знаний студентов медицинских вузов и практикующих врачей в разных странах о воздействии ИИ на здоровье человека и окружающую среду, их осведомлённости в области принципов радиационной защиты по данным отечественных и международных публикаций с последующей разработкой методов и материалов для их повышения.

Материалы и методы

Был проведён систематический обзор отечественных и зарубежных научных публикаций. Поиск литературных источников осуществлялся в следующих базах данных и информационных ресурсах: научные электронные библиотеки (eLibrary, PubMed, Scopus, Web of Science), открытые интернет-ресурсы органов здравоохранения и образовательных учреждений.

На первом этапе был проведен поиск по ключевым словам («ионизирующее излучение», «радиационная безопасность», «информированность», «студенты», «врачи», «знания», «радиационные риски», «radiation awareness», «medical students», «radiation protection knowledge», «medical practitioners») релевантных публикаций. Всего на этапе идентификации было предварительно отобрано более 50 источников.

На втором этапе проводилось удаление дубликатов и скрининг названий и аннотаций. Исключались работы, не соответствующие тематике (например, посвящённые исключительно техническим аспектам дозиметрии без оценки знаний персонала), а также публикации, не содержащие эмпирических данных (редакционные материалы, краткие комментарии без методологии).

В итоговые материалы для подготовки статьи включались литературные источники, соответствующие следующим критериям:

1. Тематика исследования должна быть посвящена оценке знаний, осведомлённости, восприятия рисков, тревожности или компетенций в области РБ среди студентов медицинских специальностей, среднего медицинского персонала или практикующих врачей.

2. Дизайн исследования – количественные исследования (анкетирование, опросы, тестирование), аналитические обзоры, сравнительные исследования, оценки эффективности образовательных вмешательств.

3. Период публикаций с 2009 по 2024 год, так как срок обучения медицинским специальностям в разных странах может составлять более 10 лет при необходимости учёта трудового стажа после получения образования.

4. Географически должны быть представлены страны с разным уровнем экономического развития и уровнем медицинского образования, распространённости методов, использующих ИИ в рутинной врачебной практике.

Из каждой публикации извлекались следующие параметры:

- страна проведения исследования;
- категория респондентов (студенты, интерны, практикующие врачи, медицинские сёстры);
- размер выборки;
- метод сбора данных (анкетирование, тестирование, интервью);
- основные результаты (количество правильных ответов, факторы, связанные с лучшей осведомлённостью, наличие/отсутствие специализированного обучения);
- выводы о пробелах в знаниях и эффективности образовательных мероприятий.

Сравнительный анализ проводился между странами, а также по категориям обучающихся (младшие/старшие курсы, наличие/отсутствие профильных курсов, специальность) и практикующих специалистов (стаж работы, прохождение формального обучения по РБ).

Результаты и обсуждение

Уровень информированности студентов медицинских вузов по вопросам РБ

Уровень информированности студентов о рисках и методах защиты от ИИ может значительно варьировать в зависимости от страны, уровня образования и конкретной образовательной программы.

Для выявления общих закономерностей и зависимости уровня знаний от особенностей образовательных программ студентов и медицинских работников были проанализированы исследования [9–18], проведенные в различных странах, по вопросам РБ и использования ИИ в медицине.

В Польше при разрешении использования справочных материалов для ответов на вопросы не было выявлено статистически значимых различий между уровнем знаний студентов-стоматологов и студентов-рентгенологов. Среди опрошенных стоматологов выявлен больший уровень информированности у тех, кто прошёл дополнительное обучение по РБ, тогда как значимых различий между знаниями студентов младших и старших курсов не наблюдалось. При этом все опрошенные студенты демонстрировали недостаточный уровень знаний о безопасном количестве назначаемых процедур за определённый промежуток времени и переоценивали риски для беременных [9].

Норвежские студенты продемонстрировали недостаточный уровень информированности об ИИ, так как только 18 респондентов из 99 смогли преодолеть порог в 50 % правильных ответов. Наибольшую сложность представляли вопросы по определению дозы для пациента, а наименьшую — определение группы риска среди пациентов. В программу

обучения всех студентов входил курс об ИИ, но студенты отмечали недостаток знаний о рисках и дозах [10].

В Индии и Пакистане уровень информированности студентов значительно варьирует в зависимости от ВУЗа и региона. В целом, около 50 % студентов продемонстрировали базовые знания об ИИ, однако глубокое понимание биологических эффектов и методов защиты у них отсутствует [11, 12]. В Пакистане студенты-стоматологи последнего курса показали статистически значимый более высокий уровень знаний по сравнению со студентами других специальностей, что может быть связано с частым использованием методов на основе ИИ в повседневной стоматологической практике [11].

В Ирландии проводилось исследование информированности студентов на момент окончания бакалавриата и после различного срока работы в должности помощников врача. Было отмечено, что знания об основных радиологических процедурах и дозах для пациентов у студентов крайне низкие, но статистически значимо улучшаются после начала работы и клинической практики. Вместе с тем отмечается [13], что срок клинической практики не играет значимой роли в дальнейшем улучшении осведомлённости медицинских работников, и лишь 1 % опрошенных проходили профильные обучающие программы по РБ. Также было проведено исследование по включению курса по медицинской радиологии в учебную программу студентов и сравнение с контрольной группой, обучающейся по традиционной программе. Было обнаружено значительное улучшение результатов в конце пятилетнего обучения у группы, для которой был организован дополнительный курс, по сравнению с контрольной группой [14].

В Румынии была организована информационная кампания по повышению уровня знаний населения и медицинских работников, в том числе студентов медицинских специальностей, об ИИ и методах защиты от него, в том числе с помощью препаратов йодида калия. Через год было проведено анкетирование [15], показавшее, что наиболее информированными оказались студенты специальности «сестринское дело», после них наибольшее количество правильных ответов давали обучающиеся по специальностям «лечебное дело», «стоматология» и «фармация». При этом большинство респондентов упускают значительную часть правил радиационной защиты.

Согласно данным исследования [16], среди студентов выпускных курсов медицинских университетов в Австралии и Новой Зеландии, специализирующихся в области онкологии и радиационной онкологии, респонденты демонстрируют низкий уровень знаний в вопросах РБ в рамках своей будущей профессиональной деятельности. В частности, многие ошибочно полагают, что дистанционная лучевая терапия превращает пациента в источник ионизирующего излучения. Такой пробел в знаниях у большинства опрошенных студентов связывают с отсутствием в учебной программе отдельного курса по лучевой терапии и РБ [16].

Среди студентов, обучающихся на медицинских сестёр в Японии, отмечается недостаточная информированность по вопросам РБ вследствие отсутствия соответствующих курсов в программе обучения [17, 18]. При этом студенты проявляли более высокий уровень тревоги и опасения по отношению к ИИ по сравнению с американскими студентами той же специальности, которые изучали данную дисциплину

в университете. Отмечается, что повышение информированности приводило к снижению уровня тревоги у студентов [8, 17, 18].

В большинстве рассмотренных стран студенты демонстрировали недостаточный уровень знаний об ИИ, РБ и методах радиационной защиты. Ключевыми факторами, влияющими на уровень знаний студентов, стали: наличие дополнительного обучения, стаж работы и целенаправленные информационные кампании. При этом было отмечено, что уровень тревоги снижается по мере повышения уровня знаний, а системное отсутствие курсов по РБ в учебных программах остаются общей проблемой для рассмотренных стран.

Отдельного внимания заслуживает ситуация в Российской Федерации, где в образовательную программу всех медицинских работников входит РБ: как отдельный учебный цикл при подготовке специалистов гигиенического профиля и в составе учебных циклов по клиническим дисциплинам и предмета «Общая гигиена» для студентов других медицинских специальностей.

Среди студентов в России неоднократно проводились исследования уровня знаний по вопросам РБ, рисках и страхах, связанных с ИИ. По результатам исследований [1] страх облучения присущ многим студентам медицинских вузов, независимо от их специальности, курса обучения и того, были ли ими освоены курсы по радиационной гигиене, РБ, медицине катастроф, лучевой терапии и другим дисциплинам. Повышенная тревожность отмечается в странах и регионах, находящихся в непосредственной близости от мест наиболее широко известных для общественности радиационных аварий, таких как аварии на ПО «Маяк» [19]. Страх облучения по распространенности занимает 4 место после страхов, связанных с собственным здоровьем, учёбой и болезнью родственников, что является показателем высокого уровня тревоги и страха [1].

При этом отмечается, что средний уровень тревоги и страха у студентов медицинских специальностей ниже, чем у населения тех же регионов, не имеющих профильного образования [5, 19], а повышение уровня информированности повышает их уверенность в своем профессионализме.

В то же время многие респонденты неверно определяют потенциальные источники ИИ как природного, так и техногенного происхождения, несмотря на наличие соответствующих дисциплин в учебной программе [20, 21]. Более специализированные опросы показывают фрагментарный характер знаний об ИИ, в том числе его применении в медицине [22], и недостаточный уровень информированности в целом.

Студенты в России демонстрируют высокий уровень тревоги в отношении воздействия ИИ, который, однако, ниже, чем у населения без медицинского образования в тех же регионах. Страх облучения занимает значимое место в структуре студенческих страхов, при этом его уровень практически не зависит от освоения профильных дисциплин. Вместе с тем повышение уровня знаний студентов по РБ способствует росту профессиональной уверенности.

Как зарубежные, так и отечественные исследования показывают, что большинство студентов обладают недостаточными знаниями в области радиационной гигиены и РБ, но при этом имеют представление об опасности ИИ не только для здоровья человека, но и окружающей среды [5, 14, 19].

*Уровень информированности
практикующих врачей по вопросам РБ*

Исследования показывают, что в большинстве учреждений различных стран многие врачи не имеют специфической подготовки по РБ при наличии права назначать и использовать методы лечения и диагностики, в том числе с использованием ИИ. Данные публикаций показывают, что многие специалисты при назначении диагностических процедур недостаточно осведомлены, какие из них связаны с применением ИИ и лучевой нагрузкой на пациента, в том числе ошибочно относят к ним методы ультразвукового исследования и магнитно-резонансной томографии [23–25]. Также отмечается, что знание и применение принципов радиационной защиты в медицинской среде остаётся низким, независимо от стажа работы и наличия методических рекомендаций на рабочем месте [25, 26].

Исследования по оценке уровня знаний о рисках проведения процедур под контролем рентгеновского излучения, методов предотвращения лучевого поражения в операционной, а также о возможностях использования данного метода для конкретных пациентов показали неудовлетворительный уровень знаний врачей-ортопедов. Большая часть респондентов не проходила специализированного обучения по РБ и не использовала в своей практике индивидуальные дозиметры. При этом, согласно результатам опроса [27], потребность в процедурах, использующих ИИ, в ортопедической хирургии очень высока, что позволяет предположить высокий уровень лучевой нагрузки на медицинских работников при их выполнении и отсутствие контроля по соблюдению норм РБ.

При том, что дети являются наиболее чувствительными к ИИ, в педиатрической практике также наблюдается недостаточная осведомлённость врачей. В исследовании [28] наблюдалась тенденция к недооценке лучевой нагрузки при использовании компьютерной томографии, в связи с чем она могла назначаться при неспецифических симптомах или имеющихся альтернативных методах диагностики, и завышению рисков от рентгенографического исследования, что затрудняло его назначение.

Многие исследования отмечают наличие тенденции к неправильной оценке риска и последствий воздействия ИИ, таких как риск возникновения злокачественных новообразований. В некоторых исследованиях наблюдается обратная зависимость уровня знаний от стажа работы специалиста [30], но почти во всех [23, 26, 29–31] сохраняется более высокий уровень знаний врачей, прошедших формальное обучение – в рамках своей основной специальности или же как дополнительное образование – по РБ.

Несмотря на повышение уровня знаний медицинских работников, в исследованиях последних лет, по сравнению с предыдущими годами, существуют определенные проблемы и вызовы, связанные с информированностью о РБ. Многие медицинские работники не проходят регулярное обучение по РБ, что может привести к недостаточной осведомлённости о современных методах и технологиях. Исследования показывают повышение уровня информированности после прохождения короткого и интенсивного обучения по РБ [29].

Заключение

Проведенный анализ отечественных и зарубежных литературных данных показал неоднородность и фрагментар-

ность знаний студентов и практикующих врачей о воздействии ИИ и принципах радиационной защиты.

Восприятие радиационных рисков в значительной степени формируется под влиянием эмоциональных и субъективных факторов, а не объективных научных данных. Многие склонны переоценивать риски, связанные с радиацией, и недооценивать другие, более значимые факторы риска для здоровья (например, курение), что обусловлено восприятием радиации как невидимой и неконтролируемой угрозы.

Основным источником информации выступают СМИ, которые зачастую предоставляют упрощенные или сенсационные сведения, что может исказить реальную картину радиационных рисков. Образовательные программы, направленные на просвещение в этой области, остаются недостаточно доступными и не всегда обеспечивают формирование адекватного уровня компетенций.

Исследования, проведенные в различных странах, включая Польшу, Норвегию, Индию, Пакистан, Ирландию, Румынию, Японию, Австралию, Новую Зеландию и Россию, свидетельствуют о недостаточном уровне информированности студентов медицинских вузов по вопросам РБ. Несмотря на наличие в учебных программах соответствующих дисциплин, студенты демонстрируют фрагментарные знания, особенно в вопросах дозиметрии, биологических эффектов облучения и методов защиты.

Значительная часть обучающихся неверно идентифицирует методы диагностики, связанные с ИИ, и переоценивает риски для отдельных групп пациентов, в частности – для беременных.

Вместе с тем установлено, что целенаправленное включение в учебные программы дополнительных курсов по РБ способствует статистически значимому повышению уровня знаний, а повышение информированности коррелирует со снижением уровня тревожности среди студентов. Отмечается, что страх облучения занимает одно из ведущих мест в структуре тревожности студентов, уступая только страхам, связанным со здоровьем, учебой и болезнью родственников.

Практически во всех проанализированных исследованиях подчеркивается, что уровень осведомлённости медицинских работников находится в прямой зависимости от прохождения формального обучения по РБ. В то же время установлено, что длительность трудового стажа и работы в должности врача сами по себе не являются фактором, обеспечивающим устойчивое повышение знаний, если не подкрепляется регулярным обучением. Кратковременные образовательные программы, такие как профильные недели или курсы, позволяют повысить уровень знаний.

Однако в целом систематическое последипломное обучение по вопросам РБ остается недостаточно развитым, что подтверждается данными о низкой доле специалистов, проходящих такое обучение.

Обобщение результатов международных и отечественных исследований позволяет заключить, что существующая система подготовки и повышения квалификации медицинских кадров в области РБ требует существенной доработки. Выявленные различия в уровне знаний между врачами разных специальностей, а также между специалистами с разным стажем работы указывают на необходимость разработки дифференцированных образовательных подходов. Эффективными стратегиями представляются: включение специализированных курсов в основные образовательные

программы медицинских вузов и колледжей, организация систематического последипломного обучения с акцентом на практические аспекты радиационной защиты, а также проведение целенаправленных информационных кампаний с использованием научно обоснованных и доступных форматов коммуникации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Водоватов Александр Валерьевич разработал дизайн исследования, участвовал в формулировке целей и задач.

Библин Артём Михайлович провел анализ данных, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Капырина Юлия Николаевна провела анализ данных, подготовила окончательный вариант статьи.

Гусева Радослава Алексеевна определила цели и задачи, провела анализ данных, подготовила промежуточный вариант рукописи.

Пузырев Виктор Геннадьевич проводил интерпретацию данных, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Имамов Алмас Азгарович проводил интерпретацию данных, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Научное обоснование Концепции обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при проведении современных рентгенодиагностических процедур».

Литература

- Архангельская Г.В., Зыкова И.А., Зеленцова С.А. Трудности информирования населения по вопросам радиационной безопасности // Радиационная гигиена. 2015. Т. 7, № 2. С. 42-49.
- Perko T. Radiation risk perception: a discrepancy between the experts and the general population // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol. 133. P. 86-91.
- Perko T., Van Oudheusden M., Turcanu C. et al. Towards a strategic research agenda for social sciences and humanities in radiological protection // Journal of Radiological Protection. 2019. Vol. 39, No 3. P. 766-784.
- Балтрукова Т.Б., Иванова О.И. Компетентностный подход к подготовке специалистов по радиационной гигиене // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 80-85.
- Балтрукова Т.Б., Дьяконова-Дьяченко Т.Б. Оценка радиотревожности выпускников медицинских высших учебных заведений // Радиационная гигиена. 2015. Т. 5, № 1. С. 25-28.
- Поцелуев Н.Ю., Жукова О.В., Нагорняк А.С. и др. Система оценки информированности граждан о радиационной обстановке с использованием социальных сетей и ресурсов открытого доступа // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2018. Т. 7, № 3 (24). С. 233-236.
- Степанова А.Ю., Екидин А.А. Выявление информационных потребностей и компетенций студенческой молодежи по обеспечению радиационной безопасности // Азимут научных исследований: педагогика и психология. 2018. Т. 7, № 3 (24). С. 233-236.
- Yoshida Y. Risk communication regarding radiation exposure by experts using two concepts of regulatory science and ALARA // Journal of Radiological Protection. 2023. Vol. 43, No 1. P. 011508.
- Furmaniak K.Z., Kołodziejka M.A., Szopiński K.T. Radiation awareness among dentists, radiographers and students // Dentomaxillofacial Radiology. 2016. Vol. 45, No 8. P. 20160097.
- Kada S. Awareness and knowledge of radiation dose and associated risks among final year medical students in Norway // Insights into Imaging. 2017. Vol. 8, No 6. P. 599-605.
- Fatima N., Ehsan S., Rehman A. et al. Assessment of Knowledge towards radiation hazards and protection protocols among medical and dental students // Pakistan Journal of Health Sciences. 2023. P. 15-19.
- Srivastava R., Jyoti B., Jha P. et al. Knowledge, attitude, perception toward radiation hazards and protection among dental undergraduate students: A study // Journal of International Oral Health. 2017. Vol. 9, No 2. P. 81-87.
- McCusker M.W., de Blacam C., Keogan M. et al. Survey of medical students and junior house doctors on the effects of medical radiation: is medical education deficient? // Irish Journal of Medical Science. 2009. Vol. 178, No 4. P. 479-483.
- O'Sullivan J., O'Connor O. J., O'Regan K. et al. An assessment of medical students' awareness of radiation exposures associated with diagnostic imaging investigations // Insights into Imaging. 2010. Vol. 1, No 2. P. 86-92.
- Prejbeanu I.M., Purcaru S., Cara M.L. et al. Romanian students' knowledge on radiation protection // European Journal of Public Health. 2023. Vol. 33, Supplement_2. P. Ckad160.1507.
- Bravery B.D., Shi K., Nicholls L. et al. Oncology and radiation oncology awareness in final year medical students in Australia and New Zealand // Journal of Cancer Education. 2020. Vol. 35, No 6. P. 1227-1236.
- Salih S., Nordin M.N., Alkatheeri A. et al. Assessment of nursing students' awareness toward ionizing radiation: cross-sectional study // Nursing Reports. 2023. Vol. 13, No 2. P. 855-864.
- Yoshida M., Iwamoto S., Okahisa R. et al. Knowledge and risk perception of radiation for Japanese nursing students after the Fukushima Nuclear Power Plant disaster // Nurse Education Today. 2020. Vol. 94. P. 104552.
- Дунчик Я.А., Дудко Ю.В. Информированность студентов о влиянии радиации на организм человека в постчернобыльский период // Актуальные проблемы гигиены, радиационной и экологической медицины. 2016. С. 51-54.
- Бойко С.Л., Александрович А.С., Зиматкина Т.И. Оценка уровня радиотревожности студентов I-III курсов Гродненского государственного медицинского университета // Современные вопросы радиационной и экологической медицины, лучевой диагностики и терапии. 2018. С. 35-41.
- Библин А.М., Водоватов А.В., Капырина Ю.Н. и др. Осведомленность студентов медицинского вуза о вопросах радиационной безопасности // Медицина и организация здравоохранения. 2024. Т. 9, № 4. С. 85-96.
- Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Васильева О.С. Исследование уровня знаний по вопросам радиационной безопасности у студентов медицинского вуза // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. 2019. С. 220-223.
- Campanella F., Rossi L., Giroletti E. et al. Are physicians aware enough of patient radiation protection? Results from a survey among physicians of Pavia District -- Italy // BMC Health Services Research. 2017. Vol. 17, No 1. P. 406.
- Madrigano R. R., Abrão K. C., Puchnick A. et al. Evaluation of non-radiologist physicians' knowledge on aspects related to ionizing radiation in imaging // Radiologia Brasileira. 2014. Vol. 47. P. 210-216.
- Aisha F.R.A.R., Anthony U.C.A.C., Hassan M.H. et al. How knowledgeable are non-radiology doctors on ionizing radiation? // Journal of Radiography and Radiation Sciences. 2019. Vol. 33, No 1. P. 17-20.

26. Provenzano D.A., Florentino S.A., Kilgore J.S. et al. Radiation safety and knowledge: an international survey of 708 interventional pain physicians // *Regional Anesthesia & Pain Medicine*. 2021. Vol. 46, No 6. P. 469-476.
27. Ousmane T.F., Zoffoun O., Lachkar A. et al. Attitudes and practices of orthopedic surgeons when using fluoroscopy in the operating room // *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2022. Vol. 15(2), P. 593-597.
28. Merzenich H., Krille L., Hammer G. P. et al. Paediatric CT scan usage and referrals of children to computed tomography in Germany - a cross-sectional survey of medical practice and awareness of radiation related health risks among physicians // *BMC Health Services Research*. 2012. Vol. 12, No 1. P. 47.
29. Asiri A.A.M. Increasing awareness of radiation hazard and radiation protection among medical staff // *Acta Scientiarum. Health Sciences*. 2023. Vol. 45. P. 2-6.
30. Barnawi R.A., Alrefai W.M., Qari F. et al. Doctors' knowledge of the doses and risks of radiological investigations performed in the emergency department // *Saudi Medical Journal*. 2018. Vol. 39(11), P. 1130-1138. doi: 10.15537/smj.2018.11.23091
31. Brown N., Jones L. Knowledge of medical imaging radiation dose and risk among doctors // *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*. 2013. Vol. 57, No 1. P. 8-14.

Поступила: 14.04.2026

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 197101, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: vodovatoff@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5191-7535, РИНЦ Author ID: 859255

Библин Артем Михайлович – руководитель информационно-аналитического центра, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-3139-2479, РИНЦ Author ID: 698045

Капырина Юлия Николаевна – ассистент кафедры общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-1018-5200, РИНЦ Author ID: 1077664

Гусева Радослава Алексеевна – студент факультета «Лечебное дело», специальность «Медико-профилактическое дело», Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0002-8605-0676, РИНЦ Author ID: 134373

Пузырев Виктор Геннадьевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-0185-3545, РИНЦ Author ID: 798333

Имамов Алмас Азгарович – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач Республики Татарстан, заведующий кафедрой профилактической медицины и экологии человека, Казанский государственный медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Казань, Россия; ORCID: 0000-0003-2608-0179, РИНЦ Author ID: 331752

Для цитирования: Водоватов А.В., Библин А.М., Капырина Ю.Н., Гусева Р.А., Пузырев В.Г., Имамов А.А. Сравнительный анализ информированности о радиационной безопасности студентов медицинских вузов и врачей // *Радиационная гигиена*. 2026. Т. 19, № 2. С. 107–114. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-107-114

Comparative analysis of radiation protection awareness among medical students and practicing physicians

Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Artem M. Biblin¹, Yuliya N. Kapryrina², Radoslava A. Guseva², Victor G. Puzyrev², Almas A. Imamov³

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

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

³ Kazan State Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

The problem of insufficient awareness among healthcare workers about the effects of ionizing radiation and radiation protection methods remains relevant worldwide, as knowledge deficits may lead to unjustified referrals for procedures, increased radiation risks for patients, and heightened anxiety. The aim of this study

Aleksandr V. Vodovатов

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

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

was a comparative analysis of the level of awareness among medical students and practicing physicians regarding the effects of ionizing radiation on human health and the principles of radiation protection, based on data from national and international publications. Materials and Methods: A systematic review and qualitative analysis of data from sociological surveys and scientific articles published between 2009 and 2024 in Russia, Poland, Norway, India, Pakistan, Ireland, Romania, Japan, Australia, and New Zealand was conducted; a total of 33 sources were analyzed. Results and Discussion: Medical students and physicians in most countries demonstrate fragmented knowledge of dosimetry, biological effects of radiation, and protection methods, while targeted additional training significantly improves the level of awareness and reduces anxiety, whereas length of service alone does not constitute a factor in improving knowledge. Conclusion: The practical significance of the work lies in substantiating the need to introduce specialized courses into the core educational programs of medical universities and to organize systematic postgraduate training on radiation safety; a promising direction is the development of differentiated educational approaches for various categories of medical personnel.

Key words: awareness, ionizing radiation, radiation protection, medical students, medical staff.

Authors' personal contribution

Aleksandr V. Vodovatov developed the study design, participated in formulating the goals and objectives.

Artem M. Biblin conducted data analysis, edited the interim version of the manuscript.

Yuliya N. Kapryina conducted data analysis, edited the interim version of the manuscript, prepared the final version of the article.

Radoslava A. Guseva defined the goals and objectives, conducted data analysis, prepared the interim version of the manuscript.

Viktor G. Puzyrev interpreted the data, edited the interim version of the manuscript.

Almas A. Imamov interpreted the data, edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was performed within a framework of research project "Scientific Substantiation of the Concept for Ensuring Radiation Safety of the Population of the Russian Federation during Modern X-ray and Radiological Procedures".

References

- Perko T. Radiation risk perception: a discrepancy between the experts and the general population. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014;133: 86-91.
- Perko T, Zic JA, Raskob W, Turcanu C, Tafili V. Towards a strategic research agenda for social sciences and humanities in radiological protection. *Journal of Radiological Protection*. 2019;39(3): 766-784.
- Arkhangelskaya GV, Zykova IA, Zelentsova SA. Difficulties of informing the public on radiation safety issues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;7(2): 42-49. (In Russian).
- Baltrukova TB, Ivanova OI. Competence-based approach to training of specialists in radiation hygiene. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 80-85. (In Russian).
- Baltrukova TB, Dyakonova-Dyachenkova TB. Assessment of radioanxiety among medical university graduates. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;5(1): 25-28. (In Russian).
- Potseluev NYu, Statsenko AS, Alekseev AV, Gvozdenko TA, Ivanov SA, Petrov VV, et al. System for assessing citizens' awareness of the radiation situation using social networks and open access resources. *Azimut Nauchnykh Issledovaniy: Ekonomika i Upravlenie = Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*. 2018;7(3(24)): 233-236. (In Russian).
- Stepanova AY, Ekin AA. Identification of information needs and competencies of students on radiation safety. *Azimut Nauchnykh Issledovaniy: Pedagogika i Psikhologiya = Azimuth of Scientific Research: Pedagogy and Psychology*. 2018;7(3(24)): 233-236. (In Russian).
- Yoshida Y. Risk communication regarding radiation exposure by experts using two concepts of regulatory science and ALARA. *Journal of Radiological Protection*. 2023;43(1): 011508.
- Furmaniak KZ, Kołodziejska MA, Szopiński KT. Radiation awareness among dentists, radiographers and students. *Dentomaxillofacial Radiology*. 2016;45(8): 20160097.
- Kada S. Awareness and knowledge of radiation dose and associated risks among final year medical students in Norway. *Insights into Imaging*. 2017;8(6): 599-605.
- Fatima N, Riaz S, Akhtar N, Jabeen S, Ali M, Khan AU, et al. Assessment of Knowledge towards radiation hazards and protection protocols among medical and dental students. *Pakistan Journal of Health Sciences*. 2023: 15-19.
- Srivastava R, Sharma S, Gupta A, Singh P, Kumar V, Mehta N, et al. Knowledge, attitude, perception toward radiation hazards and protection among dental undergraduate students: a study. *Journal of International Oral Health*. 2017;9(2): 81-87.
- McCusker MW, de Blacam C, Keogan M, McDermott R, Beddy P. Survey of medical students and junior house doctors on the effects of medical radiation: is medical education deficient? *Irish Journal of Medical Science*. 2009;178(4): 479-483.
- O'Sullivan J, O'Connor OJ, O'Regan K, Clarke B, O'Flynn S, Maher MM. An assessment of medical students' awareness of radiation exposures associated with diagnostic imaging investigations. *Insights into Imaging*. 2010;1(2): 86-92.
- Prejbeanu IM, Badescu A, Ciobanu I, Vlad C, Gheorman V, Calina D, et al. Romanian students' knowledge on radiation protection. *European Journal of Public Health*. 2023;33(Suppl 2): ckad160.1507.
- Bravery BD, Shi W, Nguyen J, Tran S, Lim C, Harris A, et al. Oncology and radiation oncology awareness in final year medical students in Australia and New Zealand. *Journal of Cancer Education*. 2020;35(6): 1227-1236.
- Salih S, Alharthi S, Alshehri S, Alqahtani M, Aloqaili R, Alshahrani A, et al. Assessment of nursing students' awareness toward ionizing radiation: cross-sectional study. *Nursing Reports*. 2023;13(2): 855-864.
- Yoshida M, Nakanishi K, Harada T, Ishiguro H, Tanaka R, Yamada S, et al. Knowledge and risk perception of radiation for Japanese nursing students after the Fukushima Nuclear Power Plant disaster. *Nurse Education Today*. 2020;94:104552.
- Danchik YA, Dudko YV. Awareness of students about the effects of radiation on the human body in the post-Chernobyl period. *Aktualnye Problemy Gigieny, Radiatsionnoy i Ekologicheskoy Meditsiny = Current Problems of Hygiene,*

- Radiation and Environmental Medicine. 2016: 51-54. (In Russian).
20. Boyko SL, Aleksandrovich AS, Zimatkina TI. Assessment of the level of radioanxiety among first-third year students of Grodno State Medical University. *Sovremennye Voprosy Radiatsionnoy i Ekologicheskoy Meditsiny, Luchevoy Diagnostiki i Terapii = Modern Issues of Radiation and Environmental Medicine, Radiation Diagnostics and Therapy*. 2018: 35-41. (In Russian).
 21. Biblin AM, Akhmatdinov RR, Vasilyeva OS, Petrova EA, Sidorov KN, Mikhailov DV, et al. Awareness of medical university students on radiation safety issues. *Meditsina i Organizatsiya Zdravookhraneniya = Medicine and Healthcare Organization*. 2024;9(4): 85-96. (In Russian).
 22. Akhmatdinov RR, Biblin AM, Vasilyeva OS. Study of the level of knowledge on radiation safety among medical university students. *Molodezh i Nauka: Aktualnye Problemy Fundamentalnykh i Prikladnykh Issledovaniy = Youth and Science: Current Problems of Fundamental and Applied Research*. 2019: 220-223. (In Russian).
 23. Campanella F, Rossi P, Bianchi L, Veronese C, Galli A, Colombo G, et al. Are physicians aware enough of patient radiation protection? Results from a survey among physicians of Pavia District -- Italy. *BMC Health Services Research*. 2017;17(1): 406.
 24. Madrigano RR, Souza LM, Oliveira AR, Santos JR, Pereira MC. Evaluation of non-radiologist physicians' knowledge on aspects related to ionizing radiation in imaging. *Radiologia Brasileira*. 2014;47: 210-216.
 25. Aisha FRAR, Mohamed SB, Hassan AH, Ibrahim WA, Elhassan MA. How knowledgeable are non-radiology doctors on ionizing radiation? *Journal of Radiography and Radiation Sciences*. 2019;33(1): 17-20.
 26. Provenzano DA, Smith JL, Williams RT, Johnson MK, Brown SE, Davis CA, et al. Radiation safety and knowledge: an international survey of 708 interventional pain physicians. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*. 2021;46(6): 469-476.
 27. Taoukreo Felna O, Zoffoun O, Lachkar A, Yacoubi H, Najib A. Attitudes and practices of orthopedic surgeons when using fluoroscopy in the operating room. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2022;15(2): 593-597. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.15.2.0870>
 28. Merzenich H, Krille L, Hammer GP, Blettner M, Zeeb H. Paediatric CT scan usage and referrals of children to computed tomography in Germany -- a cross-sectional survey of medical practice and awareness of radiation related health risks among physicians. *BMC Health Services Research*. 2012;12(1): 47.
 29. Asiri A.A.M. Increasing awareness of radiation hazard and radiation protection among medical staff. *Acta Scientiarum. Health Sciences*. 2023;45: 2-6.
 30. Barnawi RA, Alrefai WM, Qari F, Aljefri A, Hagi SK, Khafaji M. Doctors' knowledge of the doses and risks of radiological investigations performed in the emergency department. *Saudi Medical Journal*. 2018;39(11): 1130-1138. doi: 10.15537/smj.2018.11.23091
 31. Brown N, Jones L. Knowledge of medical imaging radiation dose and risk among doctors. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*. 2013;57(1): 8-14.

Received: April 14, 2026

For correspondence: Aleksandr V. Vodovatov – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory of Radiation Hygiene of Medical Facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University (8, Mira Str., Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovattoff@gmail.com); ORCID: 0000-0002-5191-7535, RSCI Author ID: 859255

Artem M. Biblin — Head of the Information and Analytical Center, Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-3139-2479, RSCI Author ID: 698045

Yuliya N. Kapyrina — Assistant of the Department of General Hygiene, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-1018-5200, RSCI Author ID: 1077664

Radoslava A. Guseva – Student of the Faculty of General Medicine, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0002-8605-0676, RSCI Author ID: 1343731

Viktor G. Puzyrev – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of General Hygiene, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-0185-3545, RSCI Author ID: 798333

Almas A. Imamov – Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Preventive Medicine and Human Ecology, Kazan State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Kazan, Russia; ORCID: 0000-0003-2608-0179, RSCI Author ID: 331752

For citation: Vodovatov A.V., Biblin A.M., Kapyrina Yu.N., Guseva R.A., Puzyrev V.G., Imamov A.A. Comparative analysis of radiation protection awareness among medical students and practicing physicians. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 107–114. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-107-114

Пространственное распределение плотности потока радона с поверхности грунта на территории города Тюмени и его окрестностей

Гурьев Н.Е., Зонова Е.О.

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Особую роль среди естественных радионуклидов занимает радон и его короткоживущие дочерние продукты распада, которые формируют от 50 до 90 % от общей дозы облучения населения. Опасность для человека представляют закрытые плохо вентилируемые помещения, в которых он может накапливаться сверх установленного гигиенического норматива. Одной из причин накопления радона в зданиях и сооружениях является его эманирование из горных пород и грунтов. Для оценки потенциальной радоноопасности земельного участка, предназначенного под строительство зданий и сооружений, применяется методика измерения плотности потока радона с поверхности грунта. Цель исследования – радиационно-экологическая оценка потенциальной радоноопасности территории г. Тюмени и его окрестностей. Материалы и методы: Исследования выполнены с мая по август 2025 г., площадь территории составляла 697 км². Измерение плотности потока радона с поверхности грунта выполнено с помощью радиометра «Альфарад плюс-Р» (Россия) в 513 контрольных точках. Одновременно в местах измерения проводилось определение метеорологических параметров (температура и влажность воздуха, атмосферное давление) и измерение физических свойств грунта (температура, плотность и полевая влажность). Создание картографического материала выполнено в геоинформационной системе QGIS. Результаты исследования и обсуждение: Плотность потока радона с поверхности грунта находится в диапазоне от 20 до 730 мБк/(с·м²). Увеличение температуры и уменьшение влажности воздуха усиливает естественную эрозию верхних горизонтов, образуя трещины и изменяя плотность, из-за чего в таких местах значения плотности потока радона с поверхности грунта возрастают. Заключение: Выделенные границы аномалий с высокими значениями плотности потока радона с поверхности грунта могут быть использованы в градостроительном планировании при строительстве, ремонте, реконструкции зданий и сооружений с целью обеспечения радиационной безопасности населения, а также органами исполнительной власти, частными фирмами в сфере инженерных изысканий и экологического мониторинга.

Ключевые слова: радон-222, плотность потока радона, Тюмень, радоноопасность.

Введение

Как известно, природные источники ионизирующего излучения являются основным фактором, определяющим дозовую нагрузку на население. Особую роль среди природных радионуклидов занимает радон и его дочерние продукты распада, которые формируют от 50 до 90 % от общей дозы облучения. Радон — это радиоактивный газ естественного происхождения, не имеющий цвета, запаха и вкуса. Наиболее долгоживущим изотопом радона является радон-222 с периодом полураспада 3,8 суток, образующийся в радиоактивном ряду урана-238 — радия-226 [1].

Радиоактивный распад радона-222 (далее – радон) сопровождается альфа-излучением, обладающим ограниченной проникающей способностью в веществе и высокой линейной плотностью ионизации. Длительное воздействие даже низких объемных активностей радона значительно повышает риск развития рака легкого. Международное агентство по изучению рака (IARC) классифицирует радон как канцероген 1 группы для человека [2]. Облучение населения радоном происходит за счет его эманирования из горных пород, грунтов, строительных

материалов стен зданий и сооружений, а также воды в атмосферный воздух. Увеличение объемной активности радона в грунтах характерно для зон активных разрывных нарушений земной коры и на участках с повышенным содержанием радионуклидов уранового ряда. Особую опасность для человека представляют закрытые, плохо вентилируемые помещения жилых, общественных и производственных зданий и сооружений, где возможно накопление радона до уровней, превышающих гигиенические нормативы [3, 4].

Основными видами радиоэкологических исследований радона в объектах окружающей среды являются измерения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона в воздухе эксплуатируемых и вводимых в эксплуатацию зданий и сооружений, а также плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта, характеризующей потенциальную радоноопасность земельных участков, которые в зависимости от поставленных задач используются на этапе проектирования, строительства, эксплуатации, капитального ремонта и реконструкции зданий и сооружений. Результаты измерений указанных величин используются для оценки соответствия зданий, сооружений и земельных участков действующим санитарно-эпидемиологическим требованиям согласно

Гурьев Никита Евгеньевич

Тюменский Государственный Университет

Адрес для переписки: 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6; E-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru

НРБ-99/2009¹, СанПиН 2.6.4115-25² и ОСПОРБ 99/2010³.

ППР с поверхности грунта характеризуется значительной изменчивостью. Это обусловлено геологическим строением, содержанием материнского радионуклида (радия-226) в горных породах, метеорологическими параметрами территории, а также ландшафтными условиями в целом. Так, например, диапазон ППР с поверхности грунта г. Сах-дол (Индия) варьировался в интервале от 1–9 мБк/(с·м²), а на востоке Испании от 11 до 25 мБк/(с·м²), средние значения в г. Чжухай (КНР) составляли 620 мБк/(с·м²), а г. Эшасьер (Франция) – 95 мБк/(с·м²) [5–8]. На территории Российской Федерации коллективом авторов [9] выполнены исследования на пяти площадках в Московской, Рязанской, Свердловской, Иркутской областях и Ставропольском крае, где по результатам измерений ППР с поверхности грунта на некоторых участках значения превышали 1000 мБк/(с·м²).

Одним из возможных индикаторов потенциальной радионеправильности земельных участков, связанной с высокими показателями ППР с поверхности грунта, являются показатели ЭРОА радона в воздухе помещений зданий и сооружений. В границах г. Тюмени по данным санитарно-эпидемиологических исследований ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Тюменской области» в 2024 г. зафиксированных случаев высоких значений ЭРОА радона в воздухе помещений зданий и сооружений выявлено не было [10]. Однако в многочисленных работах [4, 11] были зафиксированы значения ЭРОА радона в воздухе зданий и сооружений больше 300 Бк/м³, а в отдельных районах города — свыше 600 Бк/м³.

Цель исследования – радиационно-экологическая оценка потенциальной радионеправильности территории г. Тюмени и его окрестностей.

Задачи исследования

1. Выполнить измерения и картографически отобразить результаты пространственной вариации ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей.
2. Выявить зоны повышенных и фоновых значений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей.
3. Определить влияние метеорологических параметров, физических свойств грунтов на территории г. Тюмени и окрестностей на значения ППР с поверхности грунта.

Материалы и методы

Исследуемая территория охватывает муниципальное образование город Тюмень, в состав которого входит четыре административных округа: Центральный, Ленинский, Калининский, Восточный (далее — ЦАО, ЛАО, КАО, ВАО соответственно), с общей площадью на 2025 г. — 697 км², а также прилегающие к городу территории: с. Луговое, п. Утешевский, п. Московский, д. Падерина, д. Дударева, д. Патрушева, пгт Боровский, д. Паренкина, с. Ембаево, д. Тураева, с. Яр, д. Решетникова, п. Андреевский. По схеме физико-географического районирования Тюменской области, территории исследования относятся к Тавдинской провинции, Туринской подпровинции, лесной равнинной широтно-зональной области. Климат близок к резко континентальному, для которого характерна холодная, продолжительная зима, короткое и теплое лето, а также резкие колебания температуры в течение года [11–13]. В таблице 1 представлены метеорологические условия в период проведения работ по данным метеостанции г. Тюмени.

Таблица 1. Метеорологические условия на территории работ в период исследования (май – август 2025 г.)

[Table 1. Meteorological conditions in the work area during the study period (May – August 2025)]

Параметр [Parameter]	Макс. [Max.]	Мин. [Min.]	Среднее [Mean]
Температура, °C [Temperature, °C]	+ 40	+ 10	+ 24
Относительная влажность, % [Relative humidity, %]	94	19	55
Атмосферное давление, мм рт.ст. [Air pressure, mmHg]	758	731	749

Участок работ относится к денудационно-аккумулятивной поверхности долины р. Туры. Абсолютные отметки поверхности земли варьируются в интервале от 50 до 120 м (абсолютные отметки приведены в Балтийской системе высот) [14]. Почвенный покров территории исследования по классификации О.З. Еремченко [15] можно отнести к естественным ненарушенным, антропогенно поверхностно преобразованным и антропогенно глубоко преобразованным почвам.

¹Нормы 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.)]

²Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения: Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.6.4115-25. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27.03.2025 № 6 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 21.04.2025, регистрационный № 81916). [Sanitary and epidemiological requirements in the field of radiation safety of the population when handling ionizing radiation sources. Sanitary and epidemiological rules and norms SanPiN 2.6.4115-25. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 27.03.2025 No. 6 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 21.04.2025, registration No. 81916). (In Russ.)]

³Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18115). (In Russ.)]

Работа выполнена в период с мая по август 2025 г. в 3 этапа. На первом этапе (подготовительный) определены методы работы, в программе «SAS.Планета»⁴ с шагом 1 км в границах города, а также в ближайших окрестностях нанесены контрольные точки мест измерений ППР с поверхности грунта (рис. 1). В случаях непригодности (асфальтное покрытие) для измерения контрольная точка смещалась на незначительное расстояние от исходного положения. Если контрольная точка находилась в границах военного объекта

или стратегического предприятия, использовался метод интерполяции по ближайшим точкам. Площадь исследуемой территории составляла 697 км², из них 190 км² — во внутренней границе «ТКАД» (Тюменская кольцевая автомобильная дорога) и 317 км² — в его внешней границе, включая населенные пункты, которые согласно генеральному плану городского округа г. Тюмени на 2024 г.⁵ в перспективе могут войти в состав города.

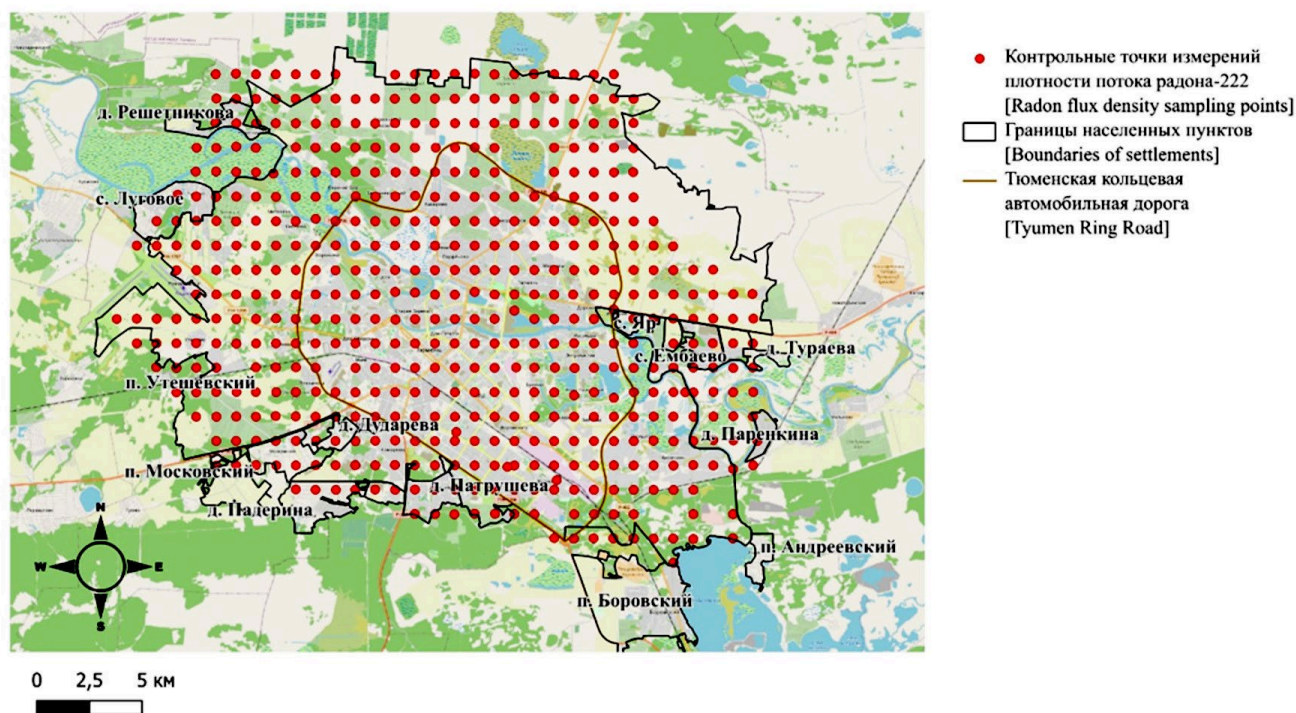


Рис. 1. Карта-схема расположения контрольных точек измерения ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей (масштаб 1:400000)

[Fig. 1. Map of the location of radon flux density sampling points from the subsoil on the territory of Tyumen and its environs (scale of 1:400000)]

На втором этапе выполнены полевые работы, в состав которых входило: измерение ППР с поверхности грунта, метеорологических параметров (температура и влажность воздуха, атмосферное давление), плотности и температуры грунта. Ориентация на местности выполнена с помощью GPS-навигатора «Garmin». Измерения ППР с поверхности грунта проведены при помощи радиометра «Альфарад плюс-Р» (Россия), предназначенного для экспрессных измерений и непрерывного мониторинга радона-222 в атмосферном воздухе, почве, воде. Работы выполнялись в период стабильных метеорологических параметров, без атмосферных осадков, с 10:00 до 17:00 по местному времени.

В случаях, когда температура воздуха была выше +35 °C и не соответствовала техническим параметрам прибора, выполнялся отбор проб с последующим анализом в лаборатории радиационной экологии Школы естественных наук ФГАО ВО «Тюменского государственного университета». Измерения выполнены в 513 контрольных точках, в каждой точке проведено три измерения. В контрольных точках измерений осуществлена подготовка участка размером 0,2×0,2 м, включающая в себя зачистку территории от мусора, растительности, крупных камней и рыхлавание на глубину 0,05 м. Измерения проводились через 20 минут после подготовки участка. Длительность измерений составляла 20 минут.

⁴SAS.Планета: версия 200606 (06.06.2020) / SASGIS. URL: <https://www.sasgis.org/sasplaneta/?ysclid=mlmlra3uv4133187246> (дата обращения: 14.02.2026). [SAS. Planet. Version 200606 (06.06.2020) / SASGIS. Available from: <https://www.sasgis.org/sasplaneta/?ysclid=mlmlra3uv4133187246> [Accessed 14 Feb 2026]. (In Russ..)]

⁵Тюменская городская Дума. Решение от 27.06.2024 № 105 «О внесении изменений в Генеральный план городского округа город Тюмень, утвержденный решением Тюменской городской Думы от 27.03.2008 № 9». Тюмень, 2024. URL: <https://www.tyumen-city.ru/vlast/administracii-struktura-administracii-goroda-tumeni/departaments/dzr/napravlenie-deitelnosti/departamentgradostroitelnoipolitiki/genplan/> (дата обращения: 14.02.2026). [Tyumen City Duma. Decision of 27.06.2024 No. 105 "On Amendments to the General Plan of the City District of Tyumen, approved by the decision of the Tyumen City Duma of 27.03.2008 No. 9". Tyumen; 2024. Available from: <https://www.tyumen-city.ru/vlast/administracii-struktura-administracii-goroda-tumeni/departaments/dzr/napravlenie-deitelnosti/departamentgradostroitelnoipolitiki/genplan/> [Accessed 14 Feb 2026]. (In Russ..)]

Одновременно с измерением ППР с поверхности грунта выполнены работы по определению метеорологических условий (температура и влажность воздуха, атмосферное давление), физических параметров грунтов (плотность, температура и влажность). Измерение метеорологических условий выполнено с помощью прибора «Метеоскоп-М+» (Россия). Измерение температуры грунта выполнялось с помощью электронного термометра «ТР101». Определение плотности влажного грунта проводилось по методу режущего кольца согласно ГОСТ 5180-2015⁶ стальным пробоотборником ПГ-100 объемом 100 см³.

Заключительным этапом работ являлась обработка полученных результатов исследования. Выполнено сравнение полученных значений с гигиеническим нормативом, установленным в ОСПОРБ 99/2010. Создание картографического материала выполнено в геоинформационной системе QGIS⁷ методом интерполяции обратно-взвешенного расстояния.

Результаты исследования

Полученные данные свидетельствуют о высокой вариативности ППР с поверхности грунта в диапазоне от 20

до 730 мБк/(с·м²), при этом среднее арифметическое значение составило 126 мБк/(с·м²), медиана – 73 мБк/(с·м²), геометрическое среднее – 86 мБк/(с·м²), геометрическое стандартное отклонение (GSD) – 2,32. Стандартное отклонение (SD = 124 мБк/(с·м²)) подтверждает значительную дисперсию данных. Среднее арифметическое значение ППР с поверхности грунта в КАО составляет 170 мБк/(с·м²), а в ЦАО – 144 мБк/(с·м²). При этом в ЛАО и ВАО значения оказались существенно ниже и находятся в интервале от 54 до 64 мБк/(с·м²) соответственно. Для окрестностей г. Тюмени характерно неоднородное по площади распределение ППР с поверхности грунта, при этом максимальные значения приурочены к населенным пунктам, расположенным севернее, западнее и южнее городской агломерации. Так, средние арифметические значения в п. Московский, Падерина, с. Луговом, д. Решеникова, Патрушева составляют 456, 421, 218, 187 и 83 мБк/(с·м²) соответственно. В с. Ембаево, Яр и д. Паренкина, расположенных восточнее г. Тюмени, значения составляют 106, 42 и 52 мБк/(с·м²) соответственно. Результаты статистической обработки значений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты статистической обработки результатов измерений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей

[Table 2. Results of statistical processing of measurement results of radon flux density from the subsoil surface in the city of Tyumen and its surroundings]

Участок [Region]	Диапазон результатов, мБк/(с·м ²) [Range of results, mBq/(s·m ²)]	Среднее арифметическое, мБк/(с·м ²) [Arithmetic mean, mBq/(s·m ²)]	Стандартное отклонение, мБк/(с·м ²) [SD, mBq/(s·m ²)]	Медиана, мБк/(с·м ²) [Median, mBq/(s·m ²)]	СГО [GSD]
г. Тюмень [city of Tyumen]					
КАО [Kalininsky Administrative District]	20–730	170	132	137	2,33
ВАО [Eastern Administrative District]	26–285	64	43	55	1,59
ЦАО [Central Administrative District]	20–469	144	116	98	2,25
ЛАО [Leninsky Administrative District]	20–252	54	30	49	1,57
Окрестности г. Тюмени [Surroundings of Tyumen]					
Северная [Northern]	20–615	158	159	146	2,53
Южная [Southern]	27–730	249	201	184	2,57
Западная [Western]	20–399	141	113	97	2,35
Восточная [Eastern]	27–319	81	78	57	1,93

⁶ГОСТ 5180–2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Введен в действие приказом Росстандарта от 03.11.2015 № 1694-ст. [Interstate Standard GOST 5180–2015 “Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics”. Put into effect by the order of Rosstandart of 03.11.2015 No. 1694-st. (In Russ.)]

⁷QGIS: Географическая информационная система / Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Версия 3.44.6 (2025-02-21). URL: <https://qgis.org/> (дата обращения: 14.02.2026). [QGIS. Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Version 3.44.6 (2025-02-21). Available from: <https://qgis.org/> [Accessed 14 Feb 2026]. (In Russ.)]

Обсуждение

Вариативность значений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей ставит серьезную задачу по определению исходных причин высоких значений. Причинами появления зон ППР с поверхности грунта со значениями выше $80 \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, по данным отечественных ученых [16, 17], являются участки близкого залегания урановых минералов, которые формируют высокий природный радиационный фон местности, а также разломные и геодинамически активные зоны земной коры.

По данным ежегодных докладов [10], а также исследований [18, 19] среднее значение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения составляет $0,18 \text{ мкЗв}/\text{ч}$, а средняя удельная активность радия-226 в поверхностном слое грунтов территории г. Тюмени и его окрестностей – $16 \text{ Бк}/\text{кг}$, что по данным НКДАР ООН за 2024 г. в 2 раза ниже среднемирового уровня [20].

Возможная причина неравномерного распределения ППР с поверхности грунта связана не со степенью антропогенного изменения ландшафта (полученные высокие значения (свыше $80 \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$) обнаружены как на условно фоновых (естественных), не затронутых антропогенной деятельностью ландшафтах, так и на антропогенно измененных тер-

риториях), а возможно с геологическим строением территории. С геологической точки зрения четвертичные отложения территории г. Тюмени и его окрестностей разделены р. Турой на южную и северную части. В южной части города территория сложена преимущественно аллювием надпойменных террас и поймы р. Туры. Северная часть города представлена пойменными, элювиальными и делювиальными отложениями. С учетом относительной однородности геологического строения рыхлых осадочных отложений территории, можно предположить, что причиной значений ППР с поверхности грунта выше $80 \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ в северной, западной и южной частях г. Тюмени и его окрестностей могут являться более глубокие слои земной коры. Так, согласно государственной геологической карте Российской Федерации (доюрские образования Уральской серии, масштаба 1:1000000, 2009 г.), территория г. Тюмени и его окрестностей характеризуется сложным тектоническим строением, включающим наличие древних погребенных разломов (Ливановский и Тюменско-Чудиновский), а также нарушениями в земной коре. На основе имеющейся информации о тектоническом строении территории работ, а также полученных результатов радоновой съемки была составлена первая крупномасштабная карта ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей (рис. 2).

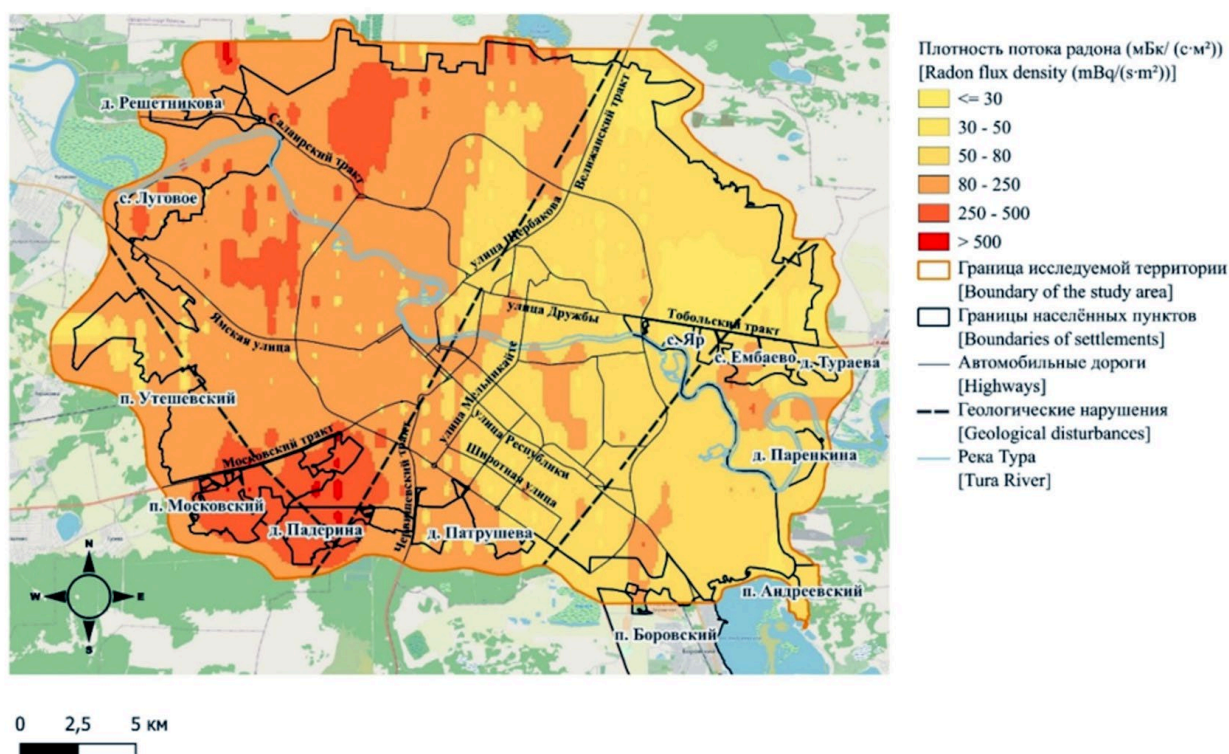


Рис. 2. Карта-схема ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей (масштаб 1:350000)

[Fig. 2. Map of the radon flux density from the subsoil on the territory of Tyumen and its environs (scale 1:350000)]

Выявленные высокие значения ППР с поверхности грунта, по-видимому, не имеют хаотичного характера пространственного размещения, а, возможно, приурочены к узлам пересечения разрывных нарушений и трещинам в земной коре (рис. 2). Высокие значения ППР с поверхности грунта (выше $80 \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$) в границах города обнаружены в ЦАО, КАО и частично ВАО, а в окрестностях г. Тюмени –

в северной (д. Решетникова), западной (с. Луговое и п. Утешевский) и южной (п. Московский, д. Падерина, д. Патрушева) частях, граничащих с указанными административными округами. Для территории ЛАО и восточных окраин (с. Яр, д. Паренкина, д. Тураева, п. Андреевский), за исключением д. Боровский и с. Ембаево, характерно относительно низкое значение ППР с поверхности грунта.

В работах отечественных ученых [16, 17, 21] неоднократно упоминается связь высоких значений ППР с поверхностью грунта с разломами земной коры, которые служат путями миграции радона из глубоких слоев к поверхности, что приводит к образованию локальных радоновых аномалий, обусловленных увеличенной эксхалляцией радона в образованных трещинах и пустотах в местах нарушений. Однако механизм его поступления на поверхность земли все еще остается предметом дискуссий в научном сообществе.

Авторы работы предполагают, что возможной причиной появления зон высоких значений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей являются особенности геологического строения и гидрогеологической стратификации территории. Гидрогеологические условия территории исследования характеризуются сложным строением залегания напорных подземных вод, которые относятся к Западно-Сибирскому мегабассейну. Появление зон с высокими значениями ППР с поверхности грунта может происходить за счет переноса радона из глубинных слоев напорными термальными подземными водами при конвективном переносе.

Неравномерное распределение плотности, гранулометрического состава отложений и гидростатического давления из-за зон нагрева отложений термальными водами и их охлаждения на отдельных участках может создавать подъемную силу, где в местах трещин, макропор и пустот происходит увеличение значений ППР с поверхности грунта.

Перенос радона из глубинных слоев земной коры в верхний поверхностный слой грунта, а также его последующая эксхалляция в атмосферу представляют собой сложные процессы, подверженные влиянию множества взаимосвязанных факторов. В таблице 3 представлены результаты анализа связи ППР с поверхности грунта с метеорологическими параметрами и физическими свойствами грунтов. Для анализа использовались результаты измерений температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, плотности, температуры и влажности грунтов. Коэффициенты корреляции оценивались следующим образом: менее 0,3 – слабая связь, от 0,3 до 0,5 – умеренная, от 0,5 до 0,7 – значительная, от 0,7 до 0,9 – сильная и более 0,9 – очень сильная.

Таблица 3. Характер взаимодействия ППР с поверхности грунта с метеорологическими параметрами и физическими свойствами грунтов

[Table 3. The interaction of radon flux density from the subsoil with meteorological parameters and physical properties of subsoil]

Параметр [Parameter]	Коэффициент корреляции [Correlation coefficient]	p-значение [p-value]
Метеорологические параметры [Meteorological parameters]		
Температура воздуха, °C [Air temperature, °C]	$r = 0,65$	$< 0,001$
Атмосферное давление, мм рт. ст. [Atmospheric pressure, mmHg]	$r = 0,21$	$< 0,001$
Влажность воздуха, % [Air humidity, %]	$r = -0,61$	$< 0,001$
Физические свойства грунтов [Physical properties of subsoil]		
Температура грунта, °C [Subsoil temperature, °C]	$r = 0,67$	$< 0,001$
Плотность грунта, г / см ³ [Subsoil density, g/cm ³]	$r = -0,69$	$< 0,001$
Полевая влажность грунта, % [Field subsoil moisture, %]	$r = -0,61$	0,475

Причина изменений значений ППР в верхнем поверхностном слое грунта на территории исследования связана с процессами воздухообмена между грунтом и приземной частью атмосферы в результате конвекции. Проведенный анализ выявил различную степень взаимосвязи ППР с поверхности грунта с метеорологическими параметрами и физическими свойствами грунтов. Процессы воздухообмена между средами происходят за счет наличия в грунте макропор и трещин, образованных в результате физической эрозии, а также деятельности живых организмов. Увеличение температуры и уменьшение влажности воздуха приводят к постепенному уменьшению количества грунтовой влаги и увеличению плотности верхних слоев грунта. В плотных верхних горизонтах грунта тяжелосуглинистого и глинистого гранулометрического состава образуются микротрещины и пустоты из-за их естественной физической эрозии. В городских ландшафтах газопроницаемость грунта, от которой зависят значения ППР с поверхности грунта, может изменяться. Механические воздействия на грунты приводит к их переуплотнению, в результате чего разрушаются макро-

поры, это снижает газопроницаемость грунтов и, как следствие, уменьшает значения ППР в поверхностной части [9].

Заключение

На данный момент авторами выполнена первая крупномасштабная съемка ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей с целью определения потенциально радоноопасных территорий, выделены границы аномалий с высокими значениями ППР с поверхности грунта. Полученные результаты могут быть использованы в градостроительном планировании при строительстве, ремонте, реконструкции зданий и сооружений с целью обеспечения радиационной безопасности населения, а также органами исполнительной власти (администрация г. Тюмени, департамент недропользования и экологии Тюменской области, департамент городского хозяйства г. Тюмени, Управлением Роспотребнадзора по Тюменской области и др.), частными фирмами в сфере инженерных изысканий и экологического мониторинга.

В ходе исследования были решены все поставленные задачи:

1. Выполнена первая крупномасштабная радоновая съемка территории г. Тюмени и его окрестностей с последующим картографированием полученных результатов с выделением зон низких и высоких значений ППР с поверхности грунта.

2. Анализ данных показал, что 29 и 14 % полученных значений превышают 80 и 250 мБк/(с·м²) соответственно. Высокие значения ППР с поверхности грунта обнаружены в границах г. Тюмени в КАО, ЦАО, ВАО, а в окрестностях городской агломерации – в северных, западных и южных частях. Территории ЛАО, а также восточные окраины характеризуются относительно низкими значениями ППР с поверхности грунта с локальными участками в юго-восточном направлении выше 80 мБк/(с·м²).

3. Наибольшее влияние среди метеорологических параметров на показатель ППР с поверхности грунта оказывают температура и влажность воздуха, а также физические свойства грунта (температура, влажность и плотность). Под воздействием солнечных лучей, из-за продолжительных высоких температур воздуха, происходит испарение грунтовой влаги и ее уплотнение. В результате в поверхностном слое грунта появляются трещины и микропоры, происходит естественная физическая эрозия, из-за чего значения ППР с поверхности грунта могут увеличиваться.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Благодарности

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations, 2000. 76 p.
- IARC. Man-made fibres and radon. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, Volume 43. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 1988. 309 p.
- Araújo da Costa Xavier L., Navoni J., Souza do Amaral V. Oxidative genomic damage in humans exposed to high indoor radon levels in Northeast Brazil // Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. 2023. Vol. 889. Art. 503652. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2023.503652.
- Гузеева С.А., Митриковский А.Я. Особенности накопления радона в воздухе жилых помещений // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 2. С. 34–42.
- Zhuo W., Guo Q., Chen B., Cheng G. Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China // Journal of Environmental Radioactivity. 2008. Vol. 99, No 7. P. 1143–1148. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.01.011.
- Lei B., Zhao L., Girault F. et al. Overview and large-scale representative estimate of radon-222 flux data in China // Environmental Advances. 2023. Vol. 11. Art. 100312. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100312.
- Malik G., Parkash R., Bhutani M. et al. Radon and Thoron exhalation rates in soil near coal mines in Shahdol, Madhya Pradesh // Applied Radiation and Isotopes. 2025. Vol. 225. Art. 111994. DOI: 10.1016/j.apradiso.2025.111994.
- Grossi C., Vargas A., Camacho A. et al. Inter-comparison of different direct and indirect methods to determine radon flux from soil // Radiation Measurements. 2011. Vol. 46, No. 1. P. 112–118. DOI: 10.1016/j.radmeas.2010.07.021.
- Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.
- Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2024 году. Тюмень: Департамент недропользования и экологии Тюменской области, 2025. 168 с.
- Гусейнов А.Н. Экология города Тюмени: состояние, проблемы. Тюмень: Изд. фирма «Слово», 2001. 176 с.
- Иваненко А.С. Окрестности Тюмени. Свердловск: Средне-Уральское книжное изд-во, 1988. 205 с.
- Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. М.: Изд-во Московского университета, 1973. 246 с.
- Старков В.Д., Тюлькова Л.А. Геология, рельеф, полезные ископаемые Тюменской области. Тюмень: Тюменский дом печати, 2010. 352 с.
- Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2016. 252 с.
- Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С. Радоновая и тектоническая активность разломов земной коры (на примере Центральной Монголии) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 2. С. 243–255. DOI: 10.15372/GiG2019016.
- Удортин В.В., Езимова Ю.Е., Магомедова А.Ш. Радоновая съемка для картирования разломных зон Тимано-Североуральского региона. Сыктывкар: Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 2021. 150 с. DOI: 10.19110/89606-020.
- Гурьев Н.Е., Клименко В.В. Комплексное радиационно-экологическое исследование города Тюмени // Социально-экологические технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 278–291. DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-278-291.
- Синдирева А.В., Гурьев Н.Е., Венедиктова Ю.В., Абдуллин А.Ф. Радиационно-экологическая оценка оврага реки Тюменка в г. Тюмени // Социально-экологические технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 472–495. DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-4-472-495.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2024 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. II. Scientific Annex B: Evaluation of public exposure to ionizing radiation. New York: United Nations, 2025. 270 p.
- Микляев П.С., Петрова Т.Б., Климшин А.В. и др. Радоновые аномалии в зонах активных разломов. Сб. докл. и тез. науч.-практ. конф. «Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики», Москва, 30–31 марта 2023. М., 2023. С. 51–56.

Поступила: 06.01.2026

Гурьев Никита Евгеньевич – старший преподаватель кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук, Тюменский Государственный Университет. **Адрес для переписки:** 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6. E-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru; ORCID: 0009-0004-0602-1969, РИНЦ Author ID: 1228252

Зонова Екатерина Олеговна – студент кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук, Тюменский Государственный Университет, Тюмень, Россия; ORCID: 0009-0007-9652-1693, РИНЦ Author ID: 1341650

Для цитирования: Гурьев Н.Е., Зонова Е.О. Пространственное распределение плотности потока радона с поверхности грунта на территории города Тюмени и его окрестностей // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 115–123. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-115-123

Spatial distribution of radon flux density from subsoil surface on the territory of Tyumen and its surroundings

Nikita E. Guryev, Ekaterina O. Zonova

Tyumen State University, Tyumen, Russia

A special role among natural radionuclides is occupied by radon and its short-lived daughter decay products, which form from 50 to 90 % of the total radiation dose of the population. A danger to a person is represented by closed poorly ventilated rooms in which radon can accumulate in excess of the established hygienic standard. One of the factors for the accumulation of radon in buildings and structures is its emanation from rocks and subsoil. The method of measuring the radon flux density from the subsoil surface is used to assess the potential radon hazard of the land plot intended for the construction of buildings and structures. The purpose of the study is radiation and environmental assessment of the potential radon hazard of the territory of Tyumen and its surroundings. Materials and Methods: The studies were carried out from May to August 2025; the area covered was 697 km². The measurement of the radon flux density from the soil surface was performed using the AlphaRad Plus-R radiometer (Russia) at 513 control points. At the same time, meteorological parameters (air temperature and humidity, atmospheric pressure) were measured at the measurement sites; the physical properties of the soil (temperature, density, and field moisture) were also measured. The mapping data was created using the QGIS geoinformation system. Results and Discussion: The radon flux density from the soil surface ranges from 20 to 730 mBq/(s·m²). An increase in temperature and a decrease in air humidity intensify the natural erosion of the upper layers, causing cracks and changes in density, resulting in higher radon flux densities from the soil surface in these areas. Conclusion: The identified boundaries of anomalies with high values of radon flux density from the soil surface can be used: 1) in urban planning during the construction, repair, and reconstruction of buildings and structures in order to ensure radiation safety of the population; 2) in the field of engineering surveys and environmental monitoring by executive authorities and private firms.

Key words: radon-222, radon flux density, Tyumen; radon hazard.

Authors' personal contribution

All authors contributed equally to the preparation of this publication.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to anonymous reviewers for the work done.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2000. 76 p.
2. IARC. Man-made fibres and radon. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, Volume 43. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 1988. 309 p.
3. Araújo da Costa Xavier L, Navoni J, Souza do Amaral V. Oxidative genomic damage in humans exposed to high indoor radon levels in Northeast Brazil. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2023;889: 503652. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2023.503652.
4. Guzeva SA, Mitrikovskij AJa. Particular features of radon accumulation in the air of residential premises. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*. 2019;2: 34–42. (In Russian).

Nikita E. Guryev

Tyumen State University

Address for correspondence: 6, Volodarsky Str., Tyumen, 625033, Russia; E-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru

5. Zhuo W, Guo Q, Chen B, Cheng G. Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008;99(7): 1143–1148. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.01.011.
6. Lei B, Zhao L, Girault F, Cai Z, Luo C, Thapa S, et al. Overview and large-scale representative estimate of radon-222 flux data in China. *Environmental Advances*. 2023;11: 100312. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100312.
7. Malik G, Parkash R, Bhutani M, Hooda B, Panghal A, Malik P, et al. Radon and Thoron exhalation rates in soil near coal mines in Shahdol, Madhya Pradesh. *Applied Radiation and Isotopes*. 2025;225: 111994. DOI: 10.1016/j.apradiso.2025.111994.
8. Grossi C, Vargas A, Camacho A, López-Coto I, Bolívar J, Xia Y, et al. Inter-comparison of different direct and indirect methods to determine radon flux from soil. *Radiation Measurements*. 2011;46(1): 112–118. DOI: 10.1016/j.radmeas.2010.07.021.
9. Marennyy AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB. Patterns of Radon Field Formation in the Geological Environment. Moscow: Pero; 2016. 394 p. (In Russian).
10. Report on the environmental situation in the Tyumen region in 2024. Tyumen: Department of Subsoil Use and Ecology of the Tyumen Region; 2025. 168 p. (In Russian).
11. Guseynov AN. Ecology of the city of Tyumen: status and problems. Tyumen: Slovo Publishing House; 2001. 176 p. (In Russian).
12. Ivanenko AS. The environs of Tyumen. Sverdlovsk: Central Ural Publishing House; 1988. 205 p. (In Russian).
13. Gvozdetsky NA. Physical-geographical zoning of the Tyumen Region. Moscow: Moscow University Press; 1973. 246 p. (In Russian).
14. Starkov VD, Tyulkova LA. Geology, relief, minerals of the Tyumen region. Tyumen: Tyumensky Dom Pechati; 2010. 352 p. (In Russian).
15. Eremchenko OZ, Shestakov IE, Moskvina NV. Soils and anthropogenic surface formations in urbanized areas of the Perm Cis-Urals. Perm: Perm State National Research University; 2016. 252 p. (In Russian).
16. Seminsky KZh, Bobrov AA, Demberel S. Radon and tectonic activities of crustal faults: the case of Central Mongolia. *Geologija i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2019;60(2): 243–255. (In Russian) DOI: 10.15372/GiG2019016.
17. Udoratin VV, Ezimova JuE, Magomedova AS. Radon survey for mapping fault zones of the Timan-Severouralsk region. Syktyvkar: Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021. 150 p. (In Russian). DOI: 10.19110/89606-020
18. Guryev NE, Klimenko VV. Comprehensive radiation and ecological study of the city of Tyumen. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii = Social and Ecological Technologies*. 2023;13(3): 278–291. (In Russian) DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-278-291.
19. Sindireva AV, Guryev NE, Venediktova JuV, Abdullin AF. Radiation-ecological assessment of the ravine of the Tyumenka River, Tyumen. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii = Social and Ecological Technologies*. 2024;14(4): 472–495. (In Russian) DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-4-472-495.
20. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2024 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. II. Scientific Annex B: Evaluation of public exposure to ionizing radiation. New York: United Nations; 2025. 270 p.
21. Miklyaev PS, Petrova TB, Klimshin AV, Shhitov DV, Sidiyakin PA, Gavriliev SG. Radon anomalies in active fault zones. Sergeyevsky readings. Fundamental and applied issues of engineering geodynamics: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology, Moscow, 30–31 March 2023. Moscow: GeoInfo; 2023. P. 51–56. (In Russian).

Received: January 06, 2026

For correspondence: Nikita E. Guryev – Senior Lecturer at the Department of Geoecology and Environmental Management of the School of Natural Sciences, Tyumen State University (6, Volodarsky Str., Tyumen, 625033, Russia; E-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru); ORCID: 0009-0004-0602-1969, RSCI Author ID: 1228252

Ekaterina O. Zonova – Student at the Department of Geoecology and Environmental Management of the School of Natural Sciences, Tyumen State University, Tyumen, Russia; ORCID: 0009-0007-9652-1693, RSCI Author ID: 1341650

For citation: Guryev N.E., Zonova E.O. Spatial distribution of radon flux density from subsoil surface on the territory of Tyumen and its surroundings. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 115–123. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-115-123

Радиационный контроль на предприятиях нефтегазовой отрасли

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

В статье рассмотрены методические подходы к организации радиационного контроля на предприятиях нефтегазовой отрасли в целях обеспечения радиационной безопасности работников при облучении природными источниками ионизирующего излучения. Краткое содержание. В статье обозначена проблема отсутствия методического инструментария, определяющего порядок организации и проведения радиационного контроля на предприятиях неядерных отраслей промышленности, где возможно производственное облучение работников природными источниками ионизирующего излучения. Анализ факторов ионизирующей природы, воздействующих на работников при добыче, транспортировке и переработке нефти и газа, показал, что основной причиной повышенных уровней облучения в данной отрасли является образование производственных отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов. Отмечено, что механизмы образования отходов в нефтяной и газовой промышленности имеют различный характер. На основе практического опыта впервые предложен подход к установлению контрольных уровней по показателю снимаемого радиоактивного альфа- и бета-загрязнения технологического оборудования, соответствующих эффективной дозе облучения работников не более 5 мЗв/год. В статье рекомендованы виды необходимых исследований для оценки доз производственного облучения работников нефтяной отрасли (определение МАЭД на рабочих местах, уровней содержания радона в воздухе при отдельных видах операций, удельной активности природных радионуклидов в производственной пыли при наличии пылящих процессов) и газовой отрасли (определение уровня снимаемого радиоактивного загрязнения альфа- и бета-излучающими природными радионуклидами демонтированного оборудования, суммарной объемной бета-активности воздуха рабочей зоны при очистке оборудования от накопившегося осадка). Заключение. Представленные в материале рекомендации будут учтены при разработке методических рекомендаций по организации и проведению радиационного контроля на предприятиях неядерных отраслей промышленности при облучении работников природными источниками ионизирующего излучения в производственных условиях. Их внедрение в практику должно стать практической основой реализации требований к обеспечению радиационной безопасности работников нефтегазового комплекса Российской Федерации.

Ключевые слова: природные радионуклиды, нефтегазовая промышленность, производственные отходы с повышенным содержанием природных радионуклидов, дочерние продукты распада радона, поверхностное радиоактивное загрязнение, радиационный контроль.

Введение

Нефтегазодобывающая отрасль относится к неядерным отраслям промышленности, где, тем не менее, возможно дополнительное облучение работников природными источниками ионизирующего излучения (ПИИИ), обусловленное накоплением в производственных отходах природных ради-

онуклидов (ПРН), поступающих из земных недр вместе с добываемым сырьем. При определенных условиях аккумуляция ПРН в отходах может приводить как к образованию производственных отходов с повышенным содержанием ПРН в соответствии с ОСПОРБ 99/2010¹, так и к образованию радиоактивных отходов (РАО). При превышении критериев, установленных Постановлением Правительства РФ

¹Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115), с изменениями, внесенными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 № 43 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 05.11.2013, регистрационный № 30309). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18155), as amended by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 16.09.2013 No. 43 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No. 30309). (In Russ.)]

Кормановская Татьяна Анатольевна

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

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru

от 19.10.2012 № 1069², отходы нефтегазодобычи с повышенным содержанием ПРН относятся к низкоактивным РАО и в соответствии с Федеральным законом от 11.07.2011 № 190-ФЗ³ образуют отдельную категорию РАО – «радиоактивные отходы, образовавшиеся при осуществлении не связанных с использованием атомной энергии видов деятельности по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием ПРН».

В соответствии с требованиями п. 5.2.6 ОСПОРБ 99/2010, в организациях, в результате деятельности которых образуются производственные отходы с эффективной удельной активностью ПРН более 1500 Бк/кг, должен осуществляться радиационный контроль с целью оценки годовых эффективных доз облучения работников за счет ПИИИ, а также содержания ПРН в производственных отходах. Если дозы облучения работников на отдельных рабочих местах превышают 5 мЗв/год, и экономически обоснованные защитные мероприятия не позволяют обеспечить непрерывность данного уровня, то согласно п. 5.2.7 ОСПОРБ 99/2010 допускается отнесение соответствующих работников по условиям труда к персоналу группы А с соблюдением всех требований по обеспечению радиационной безопасности данной категории лиц и информированием о принятом решении органов, уполномоченных осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор.

Отмена ряда нормативных документов (СП 2.6.1.798-99 «Обращение с минеральным сырьем и материалами с повышенным содержанием природных радионуклидов»⁴, Сан-

ПиН 2.6.6.1169-02 «Обеспечение радиационной безопасности при обращении с производственными отходами с повышенным содержанием природных радионуклидов на объектах нефтегазового комплекса Российской Федерации»⁵, СП 2.6.1.1291-03 «Санитарные правила по обеспечению радиационной безопасности на объектах нефтегазового комплекса России»⁶, СП 2.6.1.1292-03 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения»⁷ (раздел 3.4), СП 2.6.1.2622-10 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности на объектах хранения газового конденсата в подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывной технологии»⁸), посвященных в том числе вопросам радиационного контроля рабочих мест на предприятиях нефтегазовой отрасли, привело к ситуации отсутствия в санитарном законодательстве Российской Федерации методической базы, унифицирующей порядок организации и проведения радиационного контроля рабочих мест при производственном облучении ПИИИ, обусловленном спецификой профессиональной деятельности.

На 2026 год Роспотребнадзором запланирована разработка документа, определяющего порядок организации, рекомендуемые виды и объем радиационного контроля на предприятиях неядерных отраслей промышленности, где возможно дополнительное облучение работников ПИИИ. Один из разделов документа будет посвящен проведению радиационного контроля на объектах нефтегазового комплекса Российской Федерации.

²Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 (ред. от 29.10.2022) «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов». [Decree of the Government of the Russian Federation of 19.10.2012 No. 1069 (as amended on 29.10.2022) "On the criteria for classifying solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, the criteria for classifying radioactive waste as special radioactive waste and removable radioactive waste, and the criteria for classification of removable radioactive waste". (In Russ.)]

³Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (ред. от 21.12.2021). [Federal Law No. 190-FZ of 11.07.2011 "On Radioactive Waste Management and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation" (as amended on 21.12.2021). (In Russ.)]

⁴Обращение с минеральным сырьем и материалами с повышенным содержанием природных радионуклидов: Санитарные правила СП 2.6.1.798-99. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 23.12.1999. [Handling of mineral raw materials and materials with elevated concentration of natural radionuclides. Sanitary rules SP 2.6.1.798-99. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 23.12.1999. Expired. (In Russ.)]

⁵Обеспечение радиационной безопасности при обращении с производственными отходами с повышенным содержанием природных радионуклидов на объектах нефтегазового комплекса Российской Федерации: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.6.6.1169-02. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 16.10.2002. [Ensuring radiation safety in the management of industrial waste with elevated concentration of natural radionuclides at the facilities of the oil and gas complex of the Russian Federation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.6.1169-02. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 16.10.2002. Expired. (In Russ.)]

⁶Санитарные правила по обеспечению радиационной безопасности на объектах нефтегазового комплекса России: Санитарно-эпидемиологические правила СП 2.6.1.1291-03. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 18.04.2003. [Sanitary rules for radiation safety at oil and gas facilities of Russia. Sanitary rules SP 2.6.1.1291-03. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 18.04.2003. Expired. (In Russ.)]

⁷Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарно-эпидемиологические правила СП 2.6.1.1292-03. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 18.04.2003. [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules SP 2.6.1.1292-03. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 18.04.2003. Expired. (In Russ.)]

⁸Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности на объектах хранения газового конденсата в подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывной технологии: Санитарные правила СП 2.6.1.2622-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 30.04.2010 № 52 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 07.06.2010, регистрационный № 17483). [Hygienic requirements for radiation safety at gas condensate storage facilities in underground reservoirs formed using nuclear explosive technology. Sanitary rules SP 2.6.1.2622-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 30.04.2010 No. 52 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 07.06.2010, registration No. 17483). Expired. (In Russ.)]

Цель исследования – выработать рекомендации по организации и проведению радиационного контроля на предприятиях нефтегазовой отрасли для включения в методические рекомендации «Организация радиационного обследования и санитарно-эпидемиологическая оценка показателей радиационной безопасности работников предприятий неядерных отраслей промышленности при облучении природными источниками ионизирующего излучения в производственных условиях».

Задачи исследования

1. Выполнить анализ факторов ионизирующей природы, воздействующих на работников при добыче и переработке нефти и газа.
2. Оценить виды, объем и периодичность проведения радиационного контроля.
3. Дать рекомендации по снижению уровней облучения работников за счет ПИИИ в производственных условиях.

Облучение работников, занятых в добыче, транспортировке и переработке нефти

В процессе добычи нефти из недр извлекается и пластовая вода, содержащая растворенные катионы кальция, стронция, магния, бария и радия, экстрагированные из вмещающих пород [1–3]. Перечень поступающих на поверхность ПРН включает ^{226}Ra из ряда ^{238}U , ^{228}Ra и ^{224}Ra из ряда ^{232}Th , а также их дочерние продукты распада, при этом материнские радионуклиды ^{238}U и ^{232}Th , а также ^{226}Th , в извлекаемом сырье отсутствуют [1–5]. Изменения температуры и давления при извлечении пластовой воды на поверхность вместе с нефтью приводят к осаждению содержащих изотопы радия сульфатов и карбонатов на внутренних поверхностях технологического оборудования (например, труб, клапанов, насосов, сепараторов, буллитов и скиммерных резервуаров) [4]. Основные виды отходов, накапливающихся в процессе добычи и транспортировки нефти, – это твердые осадки, солевые отложения (т.н. радиобарит), нефтешламы, для которых характерна крайняя неоднородность как по физико-химическим свойствам (твердые, сыпучие, вязкие и пр.), так и по удельной активности (УА) ПРН в них [6]. Основным критерием категорирования таких отходов в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 и ОСПОРБ 99/2010 является эффективная удельная активность ПРН ($A_{\text{эфф}}$). При превышении $A_{\text{эфф}}$ значения 1500 Бк/кг отходы, согласно СанПиН 2.6.4115-25⁹, классифицируются как производственные отходы с повышенным содержанием ПРН. При их накоплении внутри оборудования на его наружных поверхностях могут фиксиро-

ваться повышенные значения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения. При превышении $A_{\text{эфф}}$ значения 10 000 Бк/кг обращение с отходами с повышенным содержанием ПРН должно осуществляться организацией, имеющей разрешение (лицензию) на право ведения работ в области использования атомной энергии, как с РАО.

В случае нарушения радиоактивного равновесия в рядах ^{238}U и ^{232}Th расчет эффективной удельной активности ПРН в производственных отходах должен производиться с учетом их возраста (длительности периода хранения). Методика такого расчета содержалась в Приложении 1 СанПиН 2.6.6.1169-02 и Приложении 5 СанПиН 2.6.1.2800-10¹⁰, но на данный момент отсутствует в каких-либо действующих нормативных и методических документах, поэтому должна войти в качестве одного из приложений в запланированные к разработке на 2026 г. методические рекомендации.

Накопление отходов происходит внутри оборудования, поэтому в штатном режиме работы предприятий по добыче, транспортировке и переработке нефти контакт работников с нефтешламами отсутствует. Единственным фактором радиационного воздействия в данной ситуации является облучение работников за счет гамма-излучения ПРН, осевших на внутренних поверхностях оборудования. Другой сценарий облучения работников наблюдается в аварийных ситуациях и ситуации вскрытия (демонтажа) оборудования для ремонта, технического обслуживания, очистки: работники напрямую контактируют с производственными отходами с повышенным содержанием ПРН; кроме внешнего облучения возможно также внутреннее облучение за счет ингаляционного поступления радона (^{222}Rn) и его короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР), накопившихся внутри оборудования (например, цистерн, резервуаров, буллитов, танков) в процессе эманирования из нефтешламов. В случае вязких нефтешламов, представляющих собой смесь тяжелых углеводородов, плотных эмульсий и незначительных включений продуктов коррозии (окалины) и твердых осадков [7], пылерационный фактор при вскрытии эксплуатируемого оборудования отсутствует.

Облучение работников, занятых в добыче, транспортировке и переработке газа

Для образования производственных отходов, содержащих ПРН, при добыче природного газа характерен иной механизм. Одним из сопутствующих веществ добываемого сырьевого газа (наряду с сероводородом, азотом, углекислым газом, гелием и другими инертными газами) является радон (^{222}Rn) – природный радиоактивный газ, продукт распада находящегося в недрах радия (^{226}Ra). По данным [7], объемная активность радона в природном газе, добываемом в России, варьируется от 100 до 1200 Бк/м³. В ходе длитель-

⁹ Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения: Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.6.4115-25. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27.03.2025 № 6 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 21.04.2025, регистрационный № 81916). [Sanitary and epidemiological requirements in the field of radiation safety of the population when handling ionizing radiation sources. Sanitary and epidemiological rules and norms SanPiN 2.6.4115-25. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 27.03.2025 No. 6 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 21.04.2025, registration No. 81916). (In Russ.)]

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

ной эксплуатации объектов добычи и транспортировки природного газа происходит оседание и постепенное накопление на внутренних поверхностях трубопроводов и иного оборудования долгоживущих ДПР радона, являющихся твердыми веществами: свинца (^{210}Pb) с периодом полураспада 22,2 года, являющегося бета-излучателем, и его более короткоживущих ДПР – висмута (^{210}Bi) с периодом полураспада 5 суток, также являющегося бета-излучателем, и полония (^{210}Po) с периодом полураспада 138 суток, являющегося альфа-излучателем [1–3, 7]. Материнский для радона радионуклид ^{226}Ra в образующихся в процессе газодобычи производственных отходах отсутствует, таким образом, определение значения $A_{\text{эфф}}$ для данного типа отходов невозможно. В соответствии с требованиями п. 311 СанПиН 2.6.4115-25, в случае отсутствия в отходах, содержащих только ПРН, материнских радионуклидов, их отнесение к РАО осуществляется по УА отдельных ПРН в соответствии с Приложением к Критериям отнесения к РАО, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069. Для ^{210}Pb и ^{210}Po предельные значения УА (критерий отнесения к РАО) составляют 10 000 Бк/кг. Поскольку указанные радионуклиды не являются гамма-излучающими (γ ^{210}Pb и ^{210}Po выход гамма-квантов пренебрежимо мал), гамма-излучение от технологического оборудования отсутствует. Поверхностное альфа- и бета-загрязнение оборудования может присутствовать только в случае переноса отходов на наружные поверхности в ходе предыдущего технического обслуживания или аварийных ситуаций. Основными путями облучения при воздействии альфа- и бета-излучающих ПРН являются ингаляционный (вдыхание радона и его ДПР, а также долгоживущих ПРН, адсорбированных на пылевых частицах, из воздуха рабочей зоны) и пероральный (с загрязненных кожных покровов рук в процессе приема пищи при нарушении правил гигиены) [8].

Облучение работников, занятых в процессе добычи, транспортировки и переработки газа, происходит исключительно в случае вскрытия (демонтажа) оборудования вследствие возможного контакта с производственными отходами с повышенным содержанием ПРН. Ситуация осложняется тем фактом, что радиоактивное альфа- и бета-загрязнение внутренних поверхностей оборудования в большинстве случаев не сопровождается визуально определяемыми отходами, т.к. представляет собой тонкие радиоактивные пленки на внутренних поверхностях компрессоров, обратных насосов, регулирующих клапанов и некоторых других типов оборудования [1–3, 7], и может быть оценено только по результатам измерений.

Контрольные уровни факторов природного облучения при проведении производственного радиационного контроля

Основная задача радиационного контроля на производственных объектах добычи, транспортировки и переработки нефти и газа – обеспечить неперевышение дозы облучения работников ПИИИ в производственных условиях 5 мЗв/год.

В п. 4.2 НРБ-99/2009¹¹ установлены значения ряда параметров радиационной обстановки, соответствующие при монофакторном воздействии дозе 5 мЗв/год (при длительности работы 2000 ч/год): МАЭД гамма-излучения, эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона и торона, удельной активности ^{238}U и ^{232}Th в производственной пыли; указано, что при многофакторном воздействии

сумма отношений измеренных показателей данных факторов к контрольным значениям не должна превышать 1.

При решении практических задач по проведению радиационного контроля на предприятиях, занимающихся добычей и переработкой (сжижением) природного газа, специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева сталкиваются с проблемой установления подобных критериев для уровней радиоактивного загрязнения альфа- и бета-излучающими ПРН внутренних поверхностей оборудования. Обследования выполняются в период так называемого останова предприятий, когда основные технологические процессы прекращаются для проведения работ по техническому обслуживанию оборудования, сопровождающемуся вскрытием его отдельных узлов. По результатам измерений на элементах внутренних частей оборудования в ряде случаев выявляется радиоактивное альфа- и бета-загрязнение. Поскольку данное загрязнение имеет естественное происхождение (оно обусловлено оседанием ДПР радона), облучение работников за счет его воздействия относится к облучению ПИИИ в производственных условиях, однако для данного фактора в нормативных документах не установлены критерии, соответствующие при монофакторном воздействии дозе облучения 5 мЗв/год.

В рамках проведения радиационного контроля на предприятиях по добыче, транспортировке и переработке природного газа предлагается следующий подход к установлению контрольных уровней радиоактивного загрязнения поверхностей технологического оборудования: контрольные уровни по показателю плотности потока альфа- и бета-частиц снимаемого загрязнения установить в размере $\frac{1}{4}$ от приведенных в табл. 8.9 НРБ-99/2009 гигиенических нормативов для помещений периодического пребывания персонала и находящегося в них оборудования. Данные уровни (для альфа-частиц – 50 част/(см²·мин) или 1,7 Бк/см², для бета-частиц – 2500 част/(см²·мин) или 85 Бк/см²) устанавливаются пропорционально соотношению ($\frac{1}{4}$) пределов доз работников при облучении ПИИИ (5 мЗв/год) и персонала (20 мЗв/год). Соблюдение данных критериев при монофакторном воздействии гарантирует обеспечение неперевышения уровня доз облучения работников ПИИИ в производственных условиях в 5 мЗв/год, что не требует отнесения работников к персоналу группы А в соответствии с главой III НРБ-99/2009. Это подтверждается расчетами по методике МАГАТЭ [9] с учетом значения коэффициента перехода от поверхностной плотности активности ^{210}Bi на коже к мощности эквивалентной дозы его бета-излучения в коже по данным [10] при стандартной продолжительности работы 2000 ч/год согласно п. 4.2 НРБ-99/2009: в этих условиях эффективная доза облучения составит порядка 4 мЗв/год.

Производственный радиационный контроль на предприятиях нефтегазовой отрасли

На предприятиях керамической, огнеупорной и других видов промышленности, где осуществляется обращение с минеральным сырьем и материалами с повышенным содержанием ПРН, объемы и виды радиационного контроля определяются по итогам первичного радиационного обследования рабочих мест. Это объясняется известными радиационными характеристиками материалов (например, применяемого в керамической отрасли циркониевого концентрата) и типовым регламентом обращения с ними в ходе технологического процесса. Данный подход неприменим к предприятиям нефтегазовой отрасли, где процессы накопления и уровни содержания ПРН в производственных

¹¹Нормы 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.)]

отходах зависят от множества причин (обводненность месторождения, содержание ПРН в пластовых водах и др.) и на данный момент не моделируются и не поддаются прогнозу. Поэтому даже если результаты первичного радиационного обследования не выявят производственных отходов с повышенным содержанием ПРН, с течением времени такие отходы (и даже РАО) могут образовываться и воздействовать на работников предприятия.

Для оценки доз производственного облучения ПИИИ работников нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отрасли могут быть рекомендованы следующие виды исследований:

- определение МАЭД гамма-излучения на рабочих местах;
- определение уровней содержания радона в воздухе при отдельных видах операций (например, при очистке емкостей от нефтешламов);
- определение УА ПРН в производственной пыли (при наличии пылящих процессов).

Ранее в санитарных правилах СанПиН 2.6.1.2800-10 по значению $A_{эфф}$ были установлены классы минерального сырья и материалов, а также категории производственных отходов, содержащих ПРН. В СанПиН 2.6.4115-25 классификация и категорирование были упразднены. Однако для определения периодичности проведения радиационного контроля на предприятиях нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отрасли мы считаем возможным применить подход на основе категорирования производственных отходов по значению $A_{эфф}$: для предприятий, где $A_{эфф}$ в производственных отходах не превышает 1500 Бк/кг, установить периодичность проведения радиационного контроля с оценкой доз облучения работников 1 раз в 5 лет (учитывая возможность накопления ПРН); на предприятиях, где образуются отходы с $A_{эфф}$ в интервале от 1500 до 4000 Бк/кг – 1 раз в три года; если в организации образуются отходы с $A_{эфф}$ свыше 4000 Бк/кг (но не превышающие 10 000 Бк/кг) – ежегодно. Если предприятие допустило образование производственных отходов, приравненных к РАО в соответствии с Критериями отнесения к РАО, утвержденными Постановлением Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 ($A_{эфф} > 10\,000$ Бк/кг), то обращение с ними должно осуществляться специализированной организацией, имеющей разрешение на деятельность в области использования атомной энергии, в связи с тем, что данная ситуация уже выходит за рамки регулирования воздействия ПИИИ в производственных условиях.

Оценка доз производственного облучения ПИИИ работников, занятых в добыче, транспортировке и переработке природного газа, как показала практика, должна выполняться по результатам измерений уровня снимаемого радиоактивного загрязнения альфа- и бета-излучающими ПРН поверхностей демонтированного оборудования, а также (при очистке оборудования от накопившегося осадка) – по результатам измерений суммарной объемной бета-активности воздуха рабочей зоны. Поскольку образующиеся при газодобыче отходы не содержат гамма-излучающих радионуклидов, МАЭД гамма-излучения на рабочих местах обусловлена только радиационными характеристиками материалов самого оборудования, а также территории или помещений, поэтому значимого вклада в дозу производственного облучения не дает и периодического контроля не требует. Что касается сопутствующего природному газу радона, то отсутствие необходимости периодического контроля за его содержанием в воздухе рабочей зоны обеспечивается обязательной продувкой оборудования азотом перед вскрытием с целью удаления легковоспламеняющихся и взрывоопасных углеводородных продуктов.

Производственный радиационный контроль на предприятиях, осуществляющих добычу, транспортировку и переработку природного газа, должен осуществляться при каждом вскрытии технологического оборудования, непосредственно контактирующего с природным газом. При проведении операций, связанных с вскрытием оборудования с плотностью потока альфа-частиц снимаемого загрязнения более 1 част/(см²·мин) и бета-частиц снимаемого загрязнения более 10 част/(см²·мин) работники обязаны применять средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). При планировании работ по очистке технологического оборудования от производственных отходов газодобычи необходимо провести определение в них УА ^{210}Pb (^{210}Po). Поскольку данный вид исследований доступен в ограниченном числе испытательных лабораторий (центров), то длительности периода останова может не хватить для выполнения всех операций по отбору, транспортировке и испытанию проб. Поэтому целесообразно проводить эти исследования заранее (в рамках предыдущего останова). По результатам исследований принимается решение об организации, которая будет допущена к работам по очистке технологического оборудования от отходов газодобычи: если УА ^{210}Pb (^{210}Po) не превышает 10 000 Бк/кг – работы могут выполняться работниками предприятия с применением СИЗ и СИЗОД; если УА ^{210}Pb (^{210}Po) превышает 10 000 Бк/кг – работы должны осуществляться организацией, имеющей разрешение (лицензию) на деятельность в области использования атомной энергии.

Заключение

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 13.10.2018 № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» одной из основных проблем в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности является «воздействие радиационных факторов на работников организаций, осуществляющих деятельность, не связанную с использованием атомной энергии, в том числе на работников нефтяной и газовой промышленности, топливно-энергетического комплекса, горнодобывающей промышленности, строительства, космической и авиационной промышленности, медицины». Одним из этапов решения данной проблемы должна стать разработка методических рекомендаций «Организация радиационного обследования и санитарно-эпидемиологическая оценка показателей радиационной безопасности работников предприятий неядерных отраслей промышленности при облучении природными источниками ионизирующего излучения в производственных условиях». В соответствующие разделы документа войдут представленные в настоящей статье рекомендации по организации и проведению радиационного контроля на объектах нефтегазового комплекса Российской Федерации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кормановская Т.А. разработала общую концепцию исследования, определила цель исследования, проанализировала нормативно-методические документы и написала черновик рукописи.

Кононенко Д.В. определил задачи исследования, провел поиск и анализ литературных источников, выполнил необходимые расчеты, подготовил английский перевод и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Сапрыкин К.А. отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Благодарности

Авторы выражают признательность рецензентам за ценные замечания и предложения, позволившие дополнить текст важными деталями, а отдельным формулировкам придать больше четкости и строгости.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2026–2030 гг. «Развитие системы мониторинга и нормативного регулирования показателей радиационной безопасности населения России при техногенном, природном и медицинском облучении с учетом новых вызовов и угроз здоровью» по теме: «Научное обоснование совершенствования системы ограничения радиационного воздействия природных источников ионизирующего излучения на здоровье населения Российской Федерации».

Литература

1. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. IAEA Safety Report Series No. 34. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003. 130 p.
2. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. IAEA Training Course Series No. 40. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 201 p.
3. International Association of Oil & Gas Producers. Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the Oil and Gas Industry. Report 412 (Version 2.0, March 2016). IOGP, 2016. 67 p.
4. Курындин А.В., Шаповалов А.С., Тимофеев Н.Б., Верник А.Л. О нормировании выбросов и сбросов радиоактивных

веществ, образующихся в результате деятельности предприятий, не связанных с осуществлением деятельности в области использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2020. № 4 (98). С. 25–34. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.003.

5. Лисаченко Э.П., Матвеева И.Г., Стамат И.П. Формирование радионуклидного состава производственных отходов на объектах нефтегазового комплекса // Радиационная гигиена: сб. науч. трудов. СПб., 2004. С. 45–50.
6. Лисаченко Э.П., Стамат И.П. Природные радионуклиды в производственных отходах предприятий неурановых отраслей промышленности // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 64–71.
7. Нозик М.Л. Научно-методические основы обеспечения радиэкологической безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2010. 24 с.
8. Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А. Об особенностях классификации отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов в газодобывающей отрасли // Актуальные вопросы радиационной гигиены: матер. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. уч. (Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2025 г.). СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2025. С. 154–158.
9. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency. IAEA-TECDOC-1162. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000. 183 p.
10. Kocher D.C., Eckerman K.F. Electron dose-rate conversion factors for external exposure of the skin from uniformly deposited activity on the body surface // Health Physics. 1987. Vol. 53, No. 2. P. 135–141. DOI: 10.1097/00004032-198708000-00003.

Поступила: 15.04.2026

Кормановская Татьяна Анатольевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru; ORCID: 0009-0005-7922-7367, РИНЦ Author ID: 1115207

Кононенко Дмитрий Викторович – научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-1392-1226, РИНЦ Author ID: 655951

Сапрыкин Кирилл Александрович – старший научный сотрудник, заведующий лабораторией дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0003-2387-7051, РИНЦ Author ID: 1005279

Для цитирования: Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А. Радиационный контроль на предприятиях нефтегазовой отрасли // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 124–130. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-124-130

Radiation control at oil and gas industry enterprises

Tatyana A. Kormanovskaya, Dmitry V. Kononenko, Kirill A. Saprykin

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

The paper presents some methodological approaches to the organization of radiation survey and radiation control at oil and gas industry enterprises in order to ensure the radiation safety of workers exposed to natural sources of ionizing radiation. Summary. The paper highlights the issue of the lack of guidelines defining the procedure for organizing and conducting radiation survey and radiation control at enterprises in non-nuclear

Tatyana A. Kormanovskaya

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

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

industries where exposure of workers to natural sources of ionizing radiation in industrial conditions is possible. The analysis of radiation sources affecting workers during the extraction, transportation and processing of oil and gas has shown that the main reason for increased levels of exposure in this industry is the generation of industrial waste with elevated concentration of natural radionuclides. It is noted that the mechanisms of waste generation in the oil industry and the gas industry are of a different nature. Based on practical experience, an approach to setting action levels in terms of removable radioactive alpha and beta contamination of technological equipment, ensuring that the established dose limit of 5 mSv/year is not exceeded given single-factor exposure situation, have been proposed for the first time. Several types of measurements are recommended to assess the doses of exposure to workers in the oil industry (gamma dose rate in the workplaces, radon concentration during certain types of operations, activity concentration of natural radionuclides in dust in the presence of dusting processes) and the gas industry (level of removable radioactive contamination with alpha and beta emitting natural radionuclides of the dismantled equipment, gross beta activity concentration in the air of the working area during equipment cleaning from accumulated sediment). Conclusion. The recommendations presented in the paper will be taken into account when developing guidelines for the organization and conduct of radiation survey and radiation control at enterprises in non-nuclear industries where workers are exposed to natural sources of ionizing radiation in industrial conditions. The applying of the guidelines in practice should become the practical basis for implementation of the requirements for ensuring the radiation safety of workers in the oil and gas industry of the Russian Federation.

Key words: natural radionuclides, oil and gas industry, industrial waste with elevated concentration of natural radionuclides, radon progeny, surface radioactive contamination, radiation control.

Authors' personal contribution

Kormanovskaya T.A. developed the general concept of the study and defined the goal, analyzed regulatory and methodical documents, and wrote a draft of the manuscript.

Kononenko D.V. defined the objectives of the study, searched and analyzed literature data, performed the necessary calculations, made the translation, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Saprykin K.A. edited the interim version of the manuscript.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the reviewers for their valuable comments and suggestions, which made it possible to supplement the text with important details, and to give some formulations greater clarity and rigor.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral research program of Rospotrebnadzor for 2026–2030 “Development of a system for monitoring and regulatory regulation of radiation safety indicators for the Russian population under human-made, natural and medical exposure, taking into account new challenges and threats to health” on the topic: “Scientific justification for improving the system for limiting the radiation effects of natural sources of ionizing radiation on the health of the population of the Russian Federation”.

References

1. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. IAEA Safety Report Series No. 34. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2003. 130 p.
2. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. IAEA Training Course Series No. 40. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2010. 201 p.
3. International Association of Oil & Gas Producers. Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the Oil and Gas Industry. Report 412 (Version 2.0, March 2016). IOGP, 2016. 67 p.
4. Kuryndin AV, Shapovalov AS, Timofeev NB, Vernik AL. On Limiting Radioactive Discharges which arise from Activities of Industrial Facilities not Utilizing Atomic Energy. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost = Nuclear and Radiation Safety*. 2020;4(98): 25–34. (In Russian). DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.003.
5. Lisachenko EP, Matveeva IG, Stamat IP. Formation of the radionuclide composition of industrial waste at oil and gas facilities. In: *Radiation hygiene. Collection of scientific papers*. St. Petersburg; 2004. P. 45–50.
6. Lisachenko EP, Stamat IP. Natural radionuclides in residues from non-nuclear industries. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 64–71. (In Russian).
7. Nozik ML. Scientific and methodological foundations of ensuring radioecological safety at oil and gas enterprises. PhD thesis abstract. Moscow; 2010. 24 p.
8. Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Saprykin KA. On the specifics of classification of waste with elevated concentration of natural radionuclides from the gas industry. In: *Current issues of radiation hygiene. Proceedings of the all-Russian scientific and practical conference with international participation, 11-12 November 2025, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2025. P. 154–158. (In Russian).
9. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency. IAEA-TECDOC-1162. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2000. 183 p.
10. Kocher DC, Eckerman KF. Electron dose-rate conversion factors for external exposure of the skin from uniformly deposited activity on the body surface. *Health Physics*. 1987;53(2): 135–141. DOI: 10.1097/00004032-198708000-00003.

Received: April 15, 2026

For correspondence: Tatyana A. Kormanovskaya – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: f4dos@mail.ru); ORCID: 0009-0005-7922-7367, RSCI Author ID: 1115207

Dmitry V. Kononenko – Researcher, Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-1392-1226, RSCI Author ID: 655951

Kirill A. Saprykin – Senior Researcher, Head of the Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia. ORCID: 0000-0003-2387-7051, RSCI Author ID: 1005279

For citation: Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V., Saprykin K.A. Radiation control at oil and gas industry enterprises. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 124–130. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-124-130

Динамика медицинского облучения населения Ростовской области за период 2019–2024 гг.

Калинина М.В.^{1,2}, Наматян Т.Б.^{1,2}, Ковалев Е.В.^{1,2}, Жукова Т.В.², Мусиенко С.А.², Наматян А.Б.²

¹ Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области, Ростов-на-Дону, Россия

² Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Россия

Вклад медицинского облучения в коллективную дозу облучения населения возрастает как в Российской Федерации, так и в Ростовской области, что подтверждается результатами ежегодной радиационно-гигиенической паспортизации. Целью данного исследования является анализ структуры рентгенорадиологических процедур и коллективной дозы медицинского облучения в Ростовской области за период с 2019 по 2024 год. Материалы и методы: Проанализированы радиационно-гигиенические паспорта медицинских организаций за период 2019–2024 гг., а также формы федеральной государственной статистической отчетности № 3-ДОЗ и № 30. Результаты исследования и обсуждение: Результаты анализа показали, что на территории Ростовской области находится 621 медицинская организация с медицинскими источниками ионизирующего излучения, вклад частных медицинских клиник составляет 71 %. Количество рентгеновских медицинских аппаратов на 2024 год составило 1904 единицы, увеличившись на 23,32 % относительно уровня 2019 года (1544 ед.). Основной вклад в структуру лучевой диагностики за рассмотренный период вносят рентгенографические и флюорографические процедуры: 63 % и 27 % соответственно. Вклад компьютерной томографии в структуру лучевой диагностики увеличился с 4,38 % в 2019 году до 9,91 % в 2024 году. За рассмотренный период коллективная доза от медицинского облучения увеличилась в два раза — с 2067,22 до 4296,05 чел.-Зв, главным образом за счет компьютерной томографии, вклад которой менялся с 55,91 % в 2019 году до 63,11 % в 2024 году. Максимальный вклад в структуру коллективной дозы (70 %) компьютерная томография внесла в 2020 году в период COVID-19. Заключение: Увеличение количество рентгенорадиологических процедур и использование современных высокодозных методов обследования, несомненно, будут оказывать влияние на динамику изменения (увеличения) вклада медицинского диагностического облучения в коллективную дозу облучения за счет всех основных источников ионизирующего излучения.

Ключевые слова: медицинское облучение, ЕСКИД, РГП, рентгенорадиологические процедуры, новая коронавирусная инфекция, COVID-19.

Введение

Воздействие ионизирующего излучения на население планеты быстро растёт, и почти исключительно, из-за увеличения использования излучения в медицинских целях. На сегодняшний день медицинское применение источников ионизирующей излучения (ИИИ) остается главным антропогенным фактором облучения населения в большинстве развитых стран [1–3].

За последние несколько десятилетий достижения в области медицинской визуализации оказали значительное влияние на медицинскую практику. Многие рентгенорадиологические процедуры подвергают пациентов воздействию ионизирующего излучения, но несмотря это, методы медицинской визуализации являются незаменимыми инструментами для принятия диагностических решений в современной клинической практике, играя ключевую роль в выявлении заболеваний, динамическом наблюдении и оценке реакции на лечение [4, 5].

В соответствии с утвержденными Указом Президентом Российской Федерации от 13.10.2018 года № 585 «Основами государственной политики в области обеспечения

ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» обеспечение радиационной безопасности населения Российской Федерации (РФ) является одной из важнейших составляющих национальной безопасности. Одним из ключевых инструментов решения данной задачи является мониторинг радиационной обстановки и доз облучения населения от всех основных ИИИ [6].

В настоящее время радиационно-гигиеническая паспортизация (РГП) и единая система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД) стали надежным источником полной и достоверной информации о состоянии радиационной безопасности в РФ и ее субъектах и составляют основу Российской системы информационного обеспечения радиационной безопасности [7, 8].

Вклад медицинского облучения в коллективную дозу облучения населения возрастает в РФ, так и в Ростовской области (РО), что подтверждается результатами ежегодной радиационно-гигиенической паспортизации [9, 10]. Так, по итогам 2024 года данный показатель в РО составил 23,45 %, в РФ – 26,5 % (в 2019 году: РО – 12,78 %, РФ – 15,44 %).

Калинина Марина Владимировна

Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области

Адрес для переписки: 344019, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. 18 Линия, д.17; E-mail: kalinina@rpnodon.ru

Изменение структуры рентгенорадиологических процедур (РПП) и коллективной дозы медицинского облучения населения России (и РО) были обусловлены распространением новой коронавирусной инфекции. Основным методом ранней первичной диагностики COVID-19 стала компьютерная томография [11, 12], что обуславливает актуальность его регулирования с позиций основных принципов радиационной безопасности – обоснования и оптимизации.

Обеспечение надлежащей радиационной защиты населения РО при эксплуатации медицинских ИИИ невозможно без анализа существующих уровней облучения пациентов и структуры лучевой диагностики и аппаратного парка.

Цель исследования – исследование динамики медицинского облучения населения РО с 2019 по 2024 год с использованием государственных систем РФ: РГП и ЕСКИД.

Задачи исследования

1. Оценка структуры рентгенорадиологических процедур в медицинских организациях РО.
2. Анализ коллективной дозы медицинского облучения населения РО и ее структуры.
3. Оценка средних эффективных доз за счет медицинского облучения населения по РО и РФ на одну процедуру (мЗв/процедуру).

Материалы и методы

Дизайн исследования: ретроспективное сплошное наблюдательное исследование. Исследование было выполнено путем анализа данных из радиационно-гигиенических паспортов медицинских организаций¹, форм федерального государственного статистического наблюдения №3-ДОЗ² «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований», форм №30³ «Сведения о медицинской организации», проведена оценка основных показателей радиационной безопасности: средняя эффективная доза (СЭД), структура и объем РПП и коллективной дозы населения РО за отчетный период с 2019 по 2024 гг. При оценке коллективной дозы использованы официальные данные о численности населения РО за исследуемый период, размещенные на сайте Правительства Ростовской области [13]. Статистическая обработка данных выполнена с использованием программного обеспечения Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

По результатам радиационно-гигиенических паспортов РО, деятельность в области использования ИИИ на 01.01.2025 год осуществляли 621 медицинская организация (МО): из них частные медицинские клиники (далее – частные МО), где выполняются рентгенодиагностические и рентге-

ностоматологические процедуры – 71,3 %; государственные МО (лечебно-профилактические учреждения, подведомственные Минздраву РО), в т.ч. ФГБОУ ВО «РостГМУ» Минздрава России и ФГБУ «НМИЦ онкологии» Минздрава России (далее – государственные МО) – 24,3 %; медицинские организации ведомств (МВД, МО, ФМБА, ФСБ, ФСИН, Росгвардия, ОАО «РЖД») (далее – ведомственные МО) – 4,45 %. В сравнении с данными 2019 года количество МО увеличилось на 19,65 % в связи с открытием новых частных МО (рост спроса на стоматологические услуги, развитие частного сектора в медицине), а именно: стоматологических клиник (рентгеностоматологических кабинетов), частных медицинских клиник (рентгенодиагностических кабинетов, кабинетов компьютерной томографии) (рис. 1).

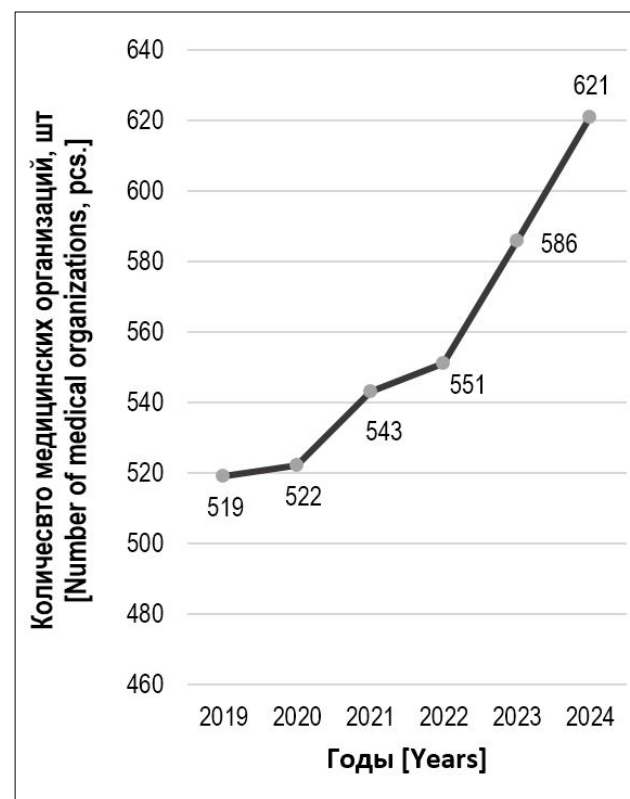


Рис. 1. Динамика числа МО с ИИИ в Ростовской области за период 2019–2024 гг.

[Fig. 1. Dynamics of the number of medical organizations with radiation sources in the Rostov region for the period 2019–2024]

В настоящее время в РО происходит модернизация средств лучевой диагностики посредством систематического обновления парка рентгенодиагностического оборудо-

¹Проведение радиационно-гигиенической паспортизации. Методические рекомендации МР 2.6.1.0257-21. Утверждены Главным государственным санитарным врачом РФ 01.09.2021. [Radiation and hygienic certification. Methodical recommendations MR 2.6.1.0257-21. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 01.09.2021 (In Russ..)]

²Форма федерального статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований» [Приказ Росстата: Об утверждении формы от 30.11.2022 № 880] [Federal Statistical Observation Form N 3-DOZ «Information on Radiation Doses of Patients during Medical X-ray and Radiological Examinations» (Order of the Federal State Statistics Service: On approval of the form dated November 30, 2022 No. 880) (In Russ..)]

³Форма федерального статистического наблюдения № 30 «Сведения о медицинской организации» [Приказ Росстата: Об утверждении формы от 29.11.2024 № 594] [The Federal state statistical surveillance form N 30 «Information about the medical organization» (Order of the Federal State Statistics Service: On approval of the form dated November 29, 2024 No. 594) (In Russ..)]

дования, что способствует переходу от традиционных аналоговых технологий к современным цифровым. Согласно формы № 30 за отчетный год в государственных медицинских учреждениях РО, процесс замены устаревшего оборудования на новые модели с цифровой обработкой рентгеновских изображений реализован практически полностью в отношении флюорографии — доля цифровых флюорографов превышает 98,6 %, доля цифровых рентгеновских аппаратов более 85 %.

В МО РО эксплуатируется свыше 1900 ед. медицинского рентгенодиагностического оборудования. В сравнении с данными 2019 года количество рентгеновских медицинских аппаратов увеличилось на 23,32 %, что составляет 4,6 рентгеновских аппаратов на 10,0 тыс. населения по данным 2024 года (табл. 1).

Таблица 1. Количество рентгеновских медицинских аппаратов, ед. эксплуатируемых в МО Ростовской области на 10,0 тыс. населения

[Table 1. Number of X-ray medical machines operated in medical organizations of the Rostov region per 10.0 thousand population]

Год [Year]	Количество рентгеновских медицинских аппаратов, ед. [Number of X-ray medical machines, units]	Количество рентгеновских аппаратов на 10,0 тыс. населения [Number of X-ray machines per 10.0 thousand population]
2019	1544	3,7
2020	1559	3,7
2021	1635	3,9
2022	1684	4,0
2023	1835	4,4
2024	1904	4,6

По итогам 2024 года в МО РО выполнено 7724445 процедур, что соответствует 1,8 РРП на жителя. В сравнении с 2019 годом общее количество РРП, выполненных в 2024 году, возросло на 6,5 % (табл. 2). Рост числа РРП обусловлен восстановлением объемов плановой медицинской помощи населению РО и возвратом МО к обычному режиму работы (после завершения пандемии COVID-19).

В сравнении с 2019 годом в 2024 году в структуре выполненных РРП отмечается рост вклада компьютерной томографии (+ 5,53 %), рост прочих (в том числе специальных) (+ 0,75 %) и радионуклидных исследований (+ 0,16 %), что свидетельствует о расширении доступности и востребованности высокодозных методов лучевой диагностики. Несмотря на развитие новых методов визуализации, вклад стандартных (рутинных) рентгенографических процедур остаётся стабильно высоким — около 63 %, вклад флюорографических (- 7,31 %) и рентгеноскопических (- 0,2 %) процедур постепенно снижается. На рисунке 2 представлена динамика структуры РРП, выполненных в МО РО с 2019 по 2024 год.

На рисунке 3 представлена динамика коллективной дозы медицинского облучения населения РО за счет проведенных РРП и КТ с 2019 по 2024 год.

Таблица 2. Количество рентгенорадиологических процедур на жителя

[Table 2. Number of X-ray and radiological procedures per citizen]

Год [Year]	Количество РРП в год [Number of X-ray and radiology procedures per year]	Количество РРП на жителя [Number of X-ray and radiological procedures per citizen]
2019	7250134	1,7
2020	6040521	1,4
2021	6468037	1,5
2022	6887172	1,6
2023	7054740	1,7
2024	7724445	1,8

По итогам 2024 года коллективная доза медицинского облучения населения составила 4296,05 чел.-Зв/год, что соответствует 1,04 мЗв/жителя. В сравнении с 2019 года (2067,22 чел.-Зв/год) коллективная доза медицинского облучения в 2024 году возросла в два раза. На фоне пандемии COVID-19 в РО в качестве основного метода контроля качества проводимого лечения использовался компьютерная томография. За исследованный период, основной вклад в коллективную дозу медицинского облучения населения вносит компьютерная томография. В сравнении с 2019 годом (1155,98 чел.-Зв/год) коллективная доза медицинского облучения в 2024 году возросла более чем вдвое (рис.3).

Представленные результаты свидетельствуют, что структура коллективной дозы медицинского облучения (чел.-Зв) населения области в 2024 году сформирована на 63,11 % компьютерной томографией, при этом, в период новой коронавирусной инфекции вклад компьютерной томографии в коллективную дозу медицинского облучения достиг ≈ 70 %.

В сравнении с 2019 годом в 2024 году в структуре коллективной дозы медицинского облучения отмечается рост вклада радионуклидных исследований (+ 4,93 %), что объясняется внедрением методов ядерной медицины (однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, совмещенная с КТ (ОФЭКТ/КТ) и позитронной эмиссионной томографии, совмещенной с КТ (ПЭТ/КТ)) в МО РО, на фоне снижения вклада флюорографии (- 4,19 %), вклада рентгенографии (- 3,1 %) за счет внедрения рентгеновского оборудования с цифровой обработкой изображения.

За анализируемый период отмечается тенденция к стабилизации вклада прочих (в том числе специальных) исследований на уровне 10 % за счет внедрения методик высокотехнологичной медицинской помощи (рис.4).

С 2019 по 2024 год СЭД медицинского облучения на одну процедуру (мЗв/ процедуру) в РО увеличилась в два раза; соответствующая динамика была отмечена и на общероссийском уровне (рис. 5).

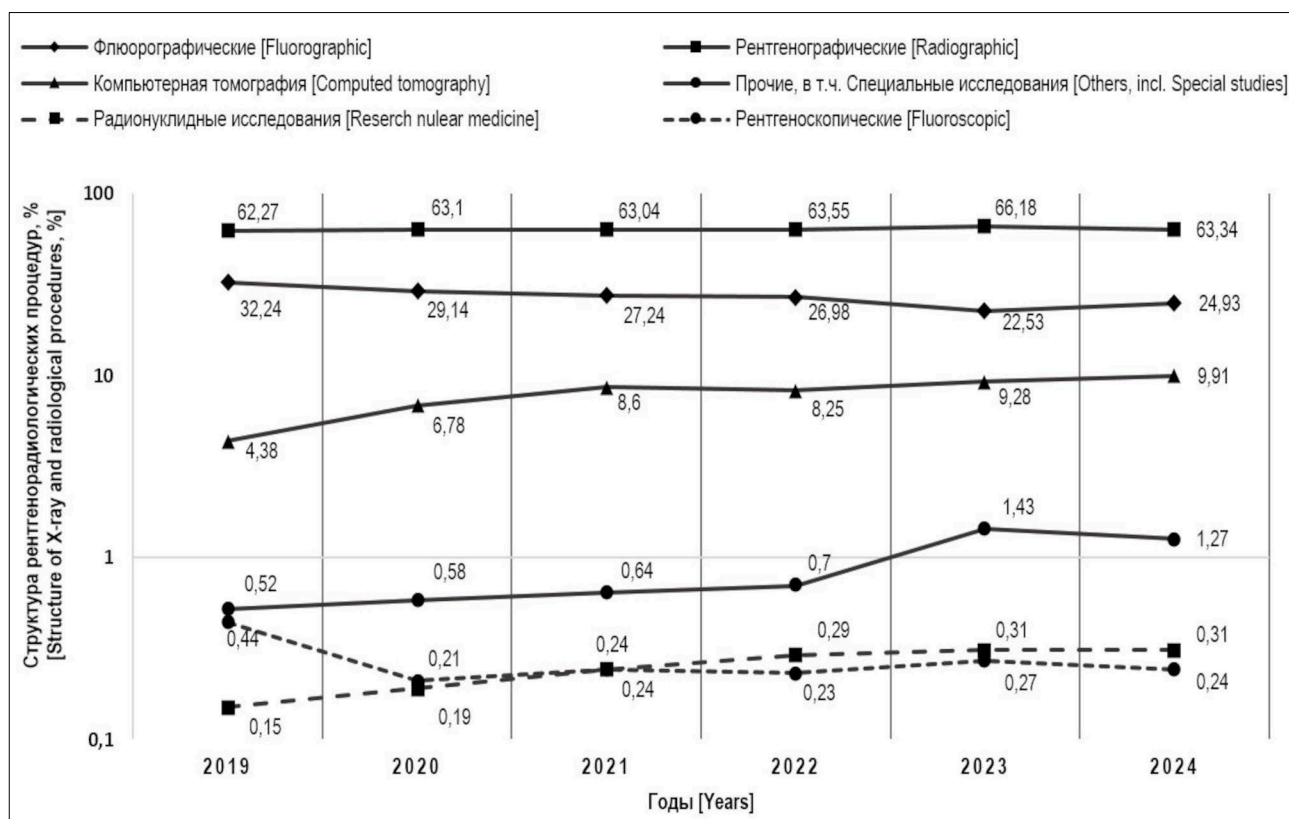


Рис. 2. Динамика структуры рентгенорадиологических процедур, выполненных в медицинских организациях Ростовской области с 2019 по 2024г.

[Fig. 2. Dynamics of the structure of X-ray and radiological procedures performed in medical organizations of the Rostov region for the period from 2019 to 2024]

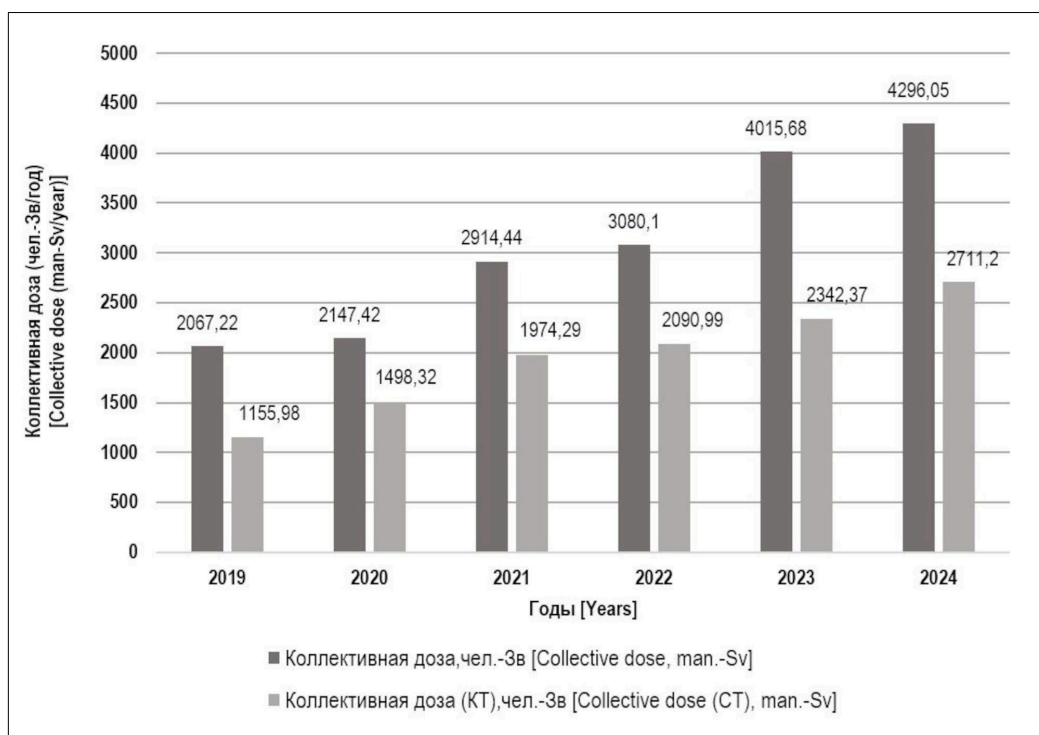


Рис. 3. Динамика коллективных доз (чел.-Зв/год) медицинского облучения населения Ростовской области с 2019 по 2024 год

[Fig. 3. Dynamics of collective doses (man-Sv/year) of medical exposure of the population of the Rostov region for the period 2019–2024]

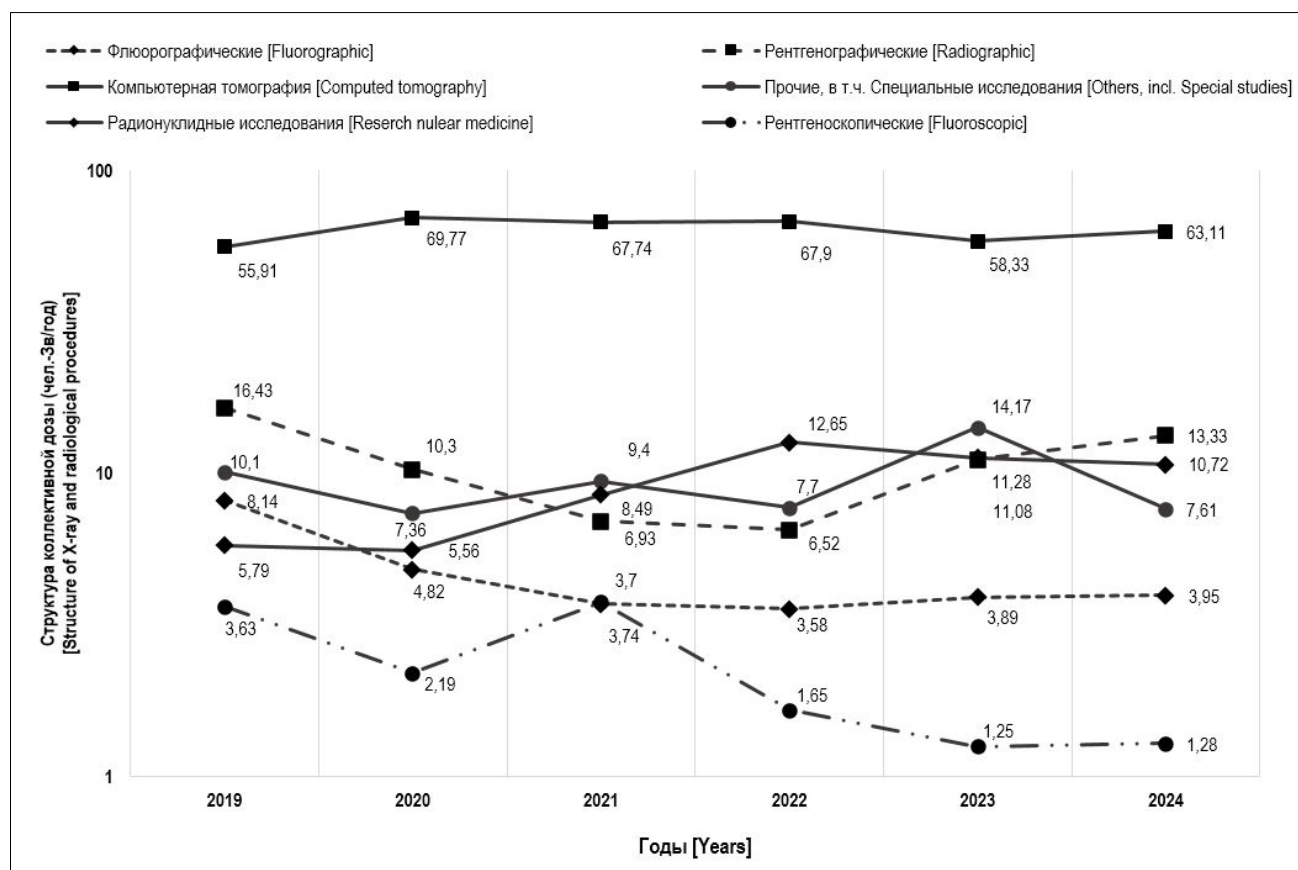


Рис. 4. Динамика структуры коллективной дозы (чел.-Зв/год) медицинского облучения населения Ростовской области с 2019 по 2024 год

[Fig. 4. Dynamics of the structure of the collective dose (man-Sv/year) of medical exposure of the population of the Rostov region for the period from 2019 to 2024]

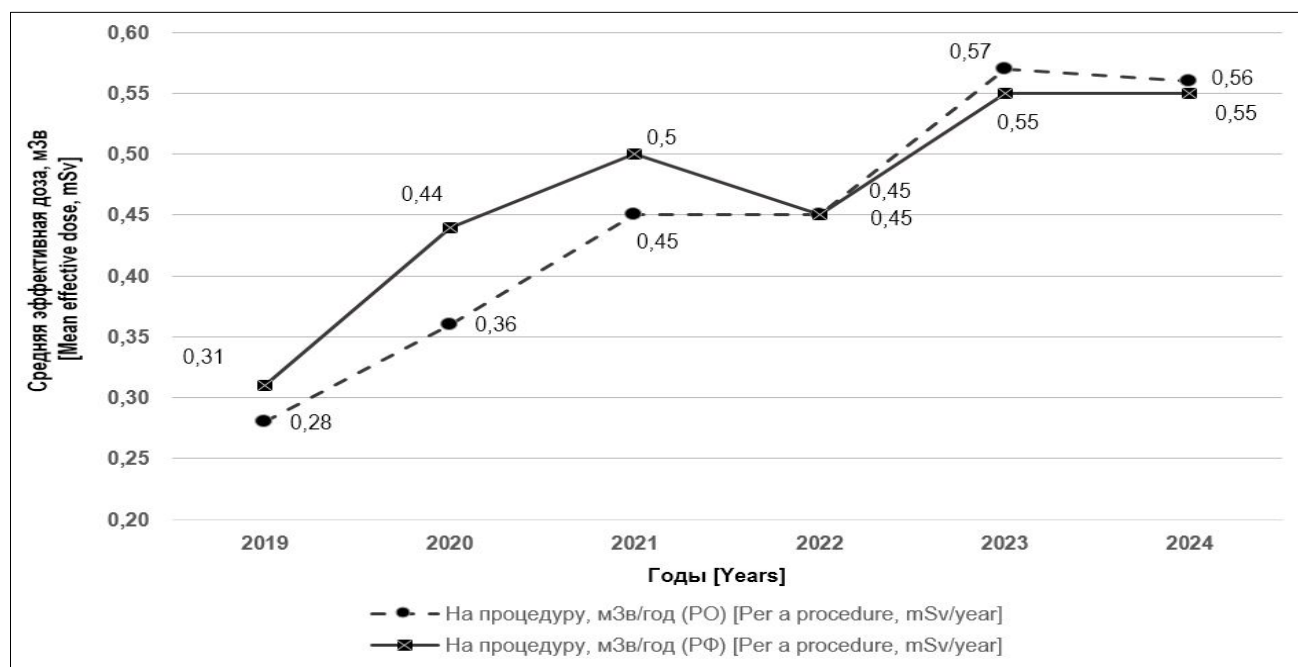


Рис. 5. Динамика средней эффективной дозы за счет медицинского облучения населения (мЗв/процедуру) по РО и РФ с 2019 по 2024 г.

[Fig. 5. Dynamics of the mean effective dose due to medical exposure of the population (mSv/procedure) for the Rostov region and Russian Federation for the period 2019 to 2024]

При этом значительный рост отмечается в период 2019–2021 гг. развития пандемии COVID-19 в связи с использованием компьютерной томографии как основного метода лучевой диагностики; в 2022 году средняя эффективная доза за процедуру (СЭД за процедуру) находится на уровне 2021 года; далее, в период 2023–2024 гг., отмечается рост и относительная стабилизация СЭД за процедуру, обусловленная восстановлением объемов плановой медицинской помощи населению РО (после завершения пандемии COVID-19) с применением высокодозных методов обследования, включая компьютерную томографию, интервенционные исследования и методы ядерной медицины (ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ).

На рисунке 5 представлены СЭД облучения населения (мЗв/процедуру) в РО и РФ с 2019 по 2024 год.

По результатам выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

- значительный вклад частных МО в общее число МО в РО не позволяет в полной мере использовать данные из формы № 30 для анализа структуры лучевой диагностики и аппаратного парка рентгеновского оборудования (данная форма заполняется только государственными МО, подведомственными Минздраву);
- использование данных из радиационно-гигиенических паспортов и формы №3-ДОЗ позволяет получить обобщенные представления об уровнях медицинского облучения населения РО. Для задач оптимизации радиационной защиты необходим анализ уровней облучения пациентов для каждого аппарата для рентгеновской или радионуклидной диагностики, с выделением оборудования с аномально высокими или низкими дозами облучения пациентов;
- стабилизация вклада компьютерной томографии в коллективную дозу населения РО на протяжении рассматриваемого периода свидетельствуют о хорошем достигнутом уровне радиационной защиты пациентов при проведении данных рентгенорадиологических процедур;
- целесообразно в приоритетном порядке сосредоточиться на оптимизации проведения рентгенографических процедур в РО в связи с ростом вклада данной категории процедур в коллективную дозу.

Заключение

Анализ представленных данных о динамике медицинского облучения населения Ростовской области показывает, что наблюдается увеличение количество рентгенорадиологических процедур и использование современных высокодозных методов обследования, включая компьютерную томографию, методы ядерной медицины (ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ) и специализированные (интервенционные) исследования, что влияет на динамику изменения (увеличения) вклада медицинского диагностического облучения в коллективную дозу облучения за счет всех основных источников ИИИ.

Основной вклад в структуру лучевой диагностики за рассмотренный период по-прежнему вносят рентгенографические и флюорографические процедуры: 63 % и 27 % соответственно. Вклад компьютерной томографии в структуру лучевой диагностики увеличился с 4,38 % в 2019 году до 9,91 % в 2024 году. Отмечается тенденция роста радионуклидных и прочих (в т.ч. специальных) исследований в структуре выполненных рентгенорадиологических процедур на фоне снижения рентгеноскопических процедур.

За анализируемый период коллективная доза от медицинского облучения увеличилась в два раза: с 2067,22 чел.-Зв до 4296,05 чел.-Зв, главным образом за счет компьютерной томографии. Максимальный вклад в структуру коллективной дозы (70 %) компьютерная томография внесла в 2020 году в период COVID-19, поскольку на тот момент данный метод был основным инструментом для раннего выявления новой коронавирусной инфекции. За период 2019–2024 гг. в структуре коллективной дозы медицинского облучения отмечается тенденция к росту радионуклидных исследований, что объясняется внедрением методов ядерной медицины (ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ) в медицинских организациях Ростовской области. Наблюдается снижение вклада флюорографии и рентгенографии в коллективную дозу, за счет внедрения рентгеновского оборудования с цифровой обработкой изображения. Вклад рентгеноскопии и прочих (в т.ч. специальных) исследований значимо за наблюдаемый период не менялся.

СЭД облучения на одну процедуру (мЗв/год) в Ростовской области за период с 2019 по 2024 год увеличилась почти вдвое: с 0,28 до 0,56 мЗв. Такая же тенденция наблюдалась в целом по России, где показатель вырос с 0,31 до 0,55 мЗв.

Таким образом, представленные данные позволяют сделать вывод о необходимости дальнейшего изучения вопросов оптимизации доз медицинского облучения населения и принятия мер по недопущению необоснованного роста доз медицинского облучения населения Ростовской области.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Калинина М.В. – формулирование идеи статьи, оформление логической структуры, написание текста, редактирование текста статьи.

Наматян Т.Б. – поиск и анализ литературы, анализ и интерпретация результатов, редактирование текста статьи, разработка дизайна исследования.

Ковалев Е.В. – обсуждение результатов исследования, окончательное утверждение публикуемой версии статьи.

Жукова Т.В. – анализ и интерпретация материалов статьи, обсуждение результатов исследования.

Мусиенко С.А. – анализ и интерпретация материалов статьи.

Наматян А.Б. – разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация материалов статьи.

Благодарности

Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить качество рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Skrk D., Zontar D. Estimated collective effective dose to the population from nuclear medicine examinations in Slovenia // Radiology and oncology. 2013. Vol. 47, No 3. P. 304–310. DOI: 10.2478/raon-2013-0048.

2. Moghadam N., Rehani M.M., Nassiri M.A. Assessment of patients' cumulative doses in one year and collective dose to population through CT examinations // *European journal of radiology*. 2021. Vol. 142. P. 109871. DOI: 10.1016/j.ejrad.2021.109871.
3. Кальницкий С.А., Целиков Н.В. Анализ медицинского облучения пациентов в рентгеновской диагностике России за полвека наблюдения (1970-2019гг) // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 4. С. 60-75. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-60-75.
4. Mercuri M., Sheth T., Natarajan M.K. Radiation exposure from medical imaging: a silent harm? // *Canadian Medical Association journal = journal de l'Association medicale canadienne*. 2011. Vol. 183, No 4. P. 413-414. DOI: 10.1503/cmaj.101885.
5. Chen J., Zheng J., Zhang Q. et al. Radiation exposure in recurrent medical imaging: identifying drivers and high-risk populations // *Frontiers in Public Health*. 2025. Vol.13. P. 1626906. DOI: 10.3389/fpubh.2025.1626906.
6. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2024. 364 с.
7. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 3. С. 7-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17.
8. Барковский А.Н., Братилова А.А., Кормановская Т.А. и др. Динамика доз облучения населения Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г. // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 4. С. 96-122. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4 -96-122.
9. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2023 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. Москва: ФБУЗ ЦЦГиЭ Роспотребнадзора, 2024. 122 с.
10. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в Ростовской области за 2024 год: радиационно-гигиенический паспорт Ростовской области. Ростов-на-Дону: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. 21 с.
11. Попова А.Ю., Водоватов А.В., Романович И.К. и др. Влияние пандемии COVID-19 на структуру лучевой диагностики и коллективные дозы населения Российской Федерации при медицинском облучении в 2020 г. // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 3. С. 6-39. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-6-39.
12. Ковалев Е.В., Калинина М.В., Конченко А.В. Характеристика медицинского облучения населения Ростовской области в условиях эпидемического процесса COVID-19 // *Актуальные вопросы радиационной гигиены: материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 10-11 октября 2023 года.* – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2023. С. 171-176.
13. Официальный сайт Правительства Ростовской области. [Онлайн ресурс]. URL: <https://www.donland.ru/result-report/2579/> (Дата обращения: 26.01.2026).

Поступила: 24.10.2025

Калинина Марина Владимировна – кандидат медицинских наук, начальник отдела надзора за радиационной безопасностью и социально-гигиенического мониторинга Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области; доцент кафедры гигиены, Ростовский государственный медицинский университет. **Адрес для переписки:** 344019, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. 18 Линия, д.17; E-mail: kalinina@rpdn.ru; ORCID: 0000-0001-6533-0965, РИНЦ Author ID: 736765

Наматян Торник Барисович – главный специалист-эксперт отдела надзора за радиационной безопасностью и социально-гигиенического мониторинга Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области; ассистент кафедры медицинской физики, математики и информационных технологий, Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Россия; ORCID: 0009-0001-1109-3009

Ковалев Евгений Владимирович – кандидат медицинских наук, руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области; доцент кафедры эпидемиологии, Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Россия; ORCID: 0000-0002-0840-4638, РИНЦ Author ID: 133727

Жукова Татьяна Васильевна – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой общей гигиены, Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Россия; ORCID: 0000-0001-8344-5467, РИНЦ Author ID: 634798

Мусиенко Сергей Анатольевич – кандидат медицинских наук, доцент кафедры гигиены, Ростовский государственный медицинский университет. Ростов-на-Дону, Россия; ORCID: 0009-0001-5624-4325, РИНЦ Author ID: 1251329

Наматян Артур Барисович – ассистент кафедры медицинской физики, математики и информационных технологий, Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Россия; ORCID: 0009-0002-4557-7324, РИНЦ Author ID: 1107266

Для цитирования: Калинина М.В., Наматян Т.Б. Ковалев Е.В., Жукова Т.В., Мусиенко С.А., Наматян А.Б. Динамика медицинского облучения населения Ростовской области за период 2019-2024 гг. // *Радиационная гигиена*. 2026. Т. 19, № 2. С. 131–139. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-131-139

Dynamics of medical exposure of the population of the Rostov region for the period 2019–2024

Marina V. Kalinina^{1,2}, Tornik B. Namatyan^{1,2}, Evgeny V. Kovalev^{1,2}, Tatyana V. Zhukova², Sergey A. Musienko²,
Artur B. Namatyan²

¹ Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Rostov Region,
Rostov-on-Don, Russia

² Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia

The contribution of medical exposure to the collective effective dose is increasing both in the Russian Federation and in the Rostov Region, as confirmed by the results of the annual radiation-hygienic passportization. The objective of this study is to analyze the structure of X-ray procedures and the collective dose from medical exposure in the Rostov Region in 2019–2024 period. Materials and Methods: The radiation-hygienic passports of medical facilities for the period 2019–2024 have been analyzed, along with the forms of federal state statistical reporting No. 3-DOZ and No. 30. Results and Discussion: The analysis indicated that there were 621 medical facilities with medical sources of ionizing radiation in the Rostov Region, with private medical clinics accounting for 71 %. In 2024 there were 1,904 X-ray units, representing an increase of 23.32 % relative to the 2019 level (1,544 X-ray units). Radiographic and fluorographic procedures constituted the primary contribution to the structure of X-ray diagnostics: 63 % and 27 %, respectively. The contribution of computed tomography to the structure of X-ray diagnostics increased from 4.38 % in 2019 to 9.91 % in 2024. Over the same period, the collective dose from medical exposure doubled, rising from 2,067.22 man - Sv to 4,296.05 man - Sv, predominantly due to computed tomography its contribution changed from 55.91 % in 2019 to 63.11 % in 2024. The maximum contribution of computed tomography to the collective dose structure (70 %) was observed in 2020, during the COVID-19 pandemic. Conclusion: The increasing number of X-ray procedures and the use of modern high-dose imaging modalities will undoubtedly influence the dynamics of change in the contribution of diagnostic medical exposure to the collective dose from all major sources of ionizing radiation.

Key words: medical exposure, Unified State System of Control and Registration of Individual Doses to Citizens, radiation-hygienic passport, X-ray and radiological procedures, novel coronavirus infection, COVID-19.

Authors' personal contribution

Kalinina M.V. – formulation of the idea of the article, design of the logical structure, writing the text, editing the text of the article.

Namatyan T.B. – search and analysis of literature, analysis and interpretation of results, editing the text of the article, development of the study design.

Kovalev E.V. – discussion of the research results, final approval of the published version of the article.

Zhukova T.V. – analysis and interpretation of the materials of the article, discussion of the research results.

Musienko S.A. – analysis and interpretation of the materials of the article.

Namatyan A.B. – development of the study design, analysis and interpretation of the results.

Acknowledgements

The authors are grateful to the reviewers for their constructive comments that made possible to improve the quality of the manuscript.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The study was not financially supported.

References

1. Skrk D, Zontar D. Estimated collective effective dose to the population from nuclear medicine examinations in Slovenia. *Radiology and oncology*. 2013;47(3): 304–310. DOI: 10.2478/raon-2013-0048.
2. Moghadam N, Rehani MM, Nassiri MA. Assessment of patients' cumulative doses in one year and collective dose to population through CT examinations. *European journal of radiology*. 2021;142: 109871. DOI: 10.1016/j.ejrad.2021.109871.
3. Kalnitsky SA, Tselikov NV. Analysis of patient medical exposure in X-ray diagnostics in Russia for half a century (1970-2019). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 60-75. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-60-75.
4. Mercuri M, Sheth T, Natarajan MK. Radiation exposure from medical imaging: a silent harm? *Canadian Medical Association journal = journal de l'Association medicale canadienne*. 2011;183(4): 413–414. DOI: 10.1503/cmaj.101885.
5. Chen J, Zheng J, Zhang Q, Zhang J, Dai Q, Zhang D. Radiation exposure in recurrent medical imaging: identifying drivers and high-risk populations. *Frontiers in Public Health*. 2025;13: 1626906. DOI: 10.3389/fpubh.2025.1626906.
6. On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2023: State report. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2024. 364 p. (In Russian).

Marina V. Kalinina

Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Rostov Region

Address for correspondence: 17, 18th Line, Rostov-on-Don, 344019, Russia; E-mail: kalinina@rpndon.ru

7. Onishchenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1: Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 7-17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17.
8. Barkovsky AN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR. Trends in the doses of the population of the Russian Federation in 2003–2018. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 96-122. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-96-122.
9. Results of radiation-hygienic passportization in the constituent entities of the Russian Federation in 2023 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2024. 122 p. (In Russian).
10. Results of radiation-hygienic passportization in the Rostov region for 2024: (Radiation-hygienic passport of the Rostov region). Rostov-on-Don: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Rostov Region; 2025. 21 p. (In Russian).
11. Popova AYU, Vodovatov AV, Romanovich IK, Ryzhov SA, Druzhinina PS, Ruslan R Akhmatdinov. The impact of the COVID-19 pandemic on the structure of radiation diagnostics and collective doses of the population of the Russian Federation under medical irradiation in 2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 6-39. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-6-39.
12. Kovalev EV, Kalinina MV, Konchenko AV. Characteristics of medical exposure of the public of the Rostov region in the context of the COVID-19 epidemic process. Current issues in radiation hygiene: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, St. Petersburg, October 10–11, 2023. – St. Petersburg: Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev; 2023. P. 171–176. (In Russian).
13. Official website of the Government of the Rostov Region. [Online resource] – Available from: <https://www.donland.ru/result-report/2579/> [Accessed 26.01.2026]. (In Russian).

Received: October 24, 2025

For correspondence: Marina V. Kalinina – Candidate of Medical Sciences, Head of the Radiation Safety Supervision and Social-Hygienic Monitoring Department, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Rostov Region; Associate Professor of the Department of Hygiene, Rostov State Medical University. (18th Line, 17, Rostov-on-Don, 344019, Russia; E-mail: kalinina@rpnodon.ru); ORCID: 0000-0001-6533-0965, RSCI Author ID: 736765

Tornik B. Namatyan - Chief Specialist-Expert of the Department of Radiation Safety Supervision and Social and Hygienic Monitoring, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Rostov Region; Assistant of the Department of Medical Physics, Mathematics and Information Technology, Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia; ORCID: 0009-0001-1109-3009

Evgeny V. Kovalev – Candidate of Medical Sciences, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Rostov Region, the Chief State Sanitary Doctor in the Rostov Region; Associate Professor of the Department of Epidemiology, Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia; ORCID: 0000-0002-0840-4638, RSCI Author ID: 1133727

Tatyana V. Zhukova – Doctor of Medical Science, Professor, Head of the Department of General Hygiene, Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia; ORCID: 0000-0001-8344-5467, RSCI Author ID: 634798

Sergey A. Musienko – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Hygiene, Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia; ORCID: 0009-0001-5624-4325, RSCI Author ID: 1251329

Artur B. Namatyan - Assistant of the Department of Medical Physics, Mathematics and Information Technology, Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia; ORCID: 0009-0002-4557-7324, RSCI Author ID: 1107266

For citation: Kalinina M.V., Namatyan T.B., Kovalev E.V., Zhukova T.V., Musienko S.A., Namatyan A.B. Dynamics of medical exposure of the population of the Rostov region for the period 2019-2024. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 131–139. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-131-139

Современные подходы к определению содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды и биологических тканях

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

Длительный сброс воды, содержащей тритий, из АЭС Фукусима-1 в Тихий океан приводит к постепенному перемещению трития в зоны рыболовства России и его накоплению в морепродуктах. Tritий включается в органические соединения, в том числе в морепродукты. При потреблении этих морепродуктов дозовые коэффициенты для органически связанных форм трития превышают значения для водных форм. Мониторинг органически связанных форм трития является важной частью радиационного контроля и оценки доз внутреннего облучения. Целью данного сообщения является обобщение современных подходов к определению органически связанного трития в объектах окружающей среды и биологических тканях. По результатам анализа научных публикаций в представленном сообщении дана краткая информация об известных, применяемых в настоящее время методах подготовки счетных образцов и методов измерения содержания органических соединений трития. Заключение: Современные методы определения органически связанного трития дают достоверные данные, но сложны и требуют стандартизации. Перспективными направлениями в определении содержания органически связанного трития являются совершенствование пробоподготовки, повышение эффективности перевода органически связанного трития в измеряемую форму, внедрение более чувствительных аналитических методов и развитие системы метрологического обеспечения.

Ключевые слова: АЭС Фукусима-1, сброс радиоактивной воды, органически связанный тритий, морепродукты, методы контроля, радиационная безопасность, население.

Введение

В результате ликвидации последствий аварии на АЭС Фукусима-1 на площадке станции накопились большие объемы высокорadioактивной воды, слив которой в Тихий океан после очистки был начат в 2023 году и будет продолжаться в течение 30 лет [1]. Распространение трития морскими течениями приведет к его постепенному накоплению в зонах рыболовства России, расположенных в районе Южных Курил, и накоплению в морепродуктах [2].

В силу своих физико-химических свойств тритий проникает и встраивается в водородсодержащие компоненты живых организмов и окружающей среды, где преобразуется: в водную форму (НТО, T_2O , DTO) [3, 4], в неорганически связанный тритий в свободной воде тканей (TFWT) и в органически связанный тритий (OBT), включающий обменную (E-OBT) и необменную (NE-OBT) формы [5].

Удельная активность трития в организмах обычно превышает удельную активность тритиевой несвязанной воды (НТО) в окружающей среде примерно в 1,5–4 раза для неорганически связанной формы трития и в 5–20 раз – для органически связанной [6]. Органические формы трития выводятся из организма гораздо медленнее водных форм [4], поэтому наблюдение за содержанием ОСТ в морепродуктах является актуальным.

Цель исследования – краткое обобщение современных подходов к определению органически связанного трития в объектах окружающей среды и биологических тканях.

Результаты и обсуждение

Использованы публикации по теме «методы определения содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды и биологических тканях» в российских и зарубежных поисковых системах и базах данных научных статей (eLIBRARY.RU, КиберЛенинка, Google Scholar, Web of Science, Scopus, PubMed) за период 2016 – 2026 гг. В результате было найдено 186 публикаций из которых для анализа были выбраны основные, описывающих методы количественного определения органически связанного трития в объектах окружающей среды.

Анализ литературных данных позволил обобщить современные подходы к подготовке проб и определению органически связанного трития в объектах окружающей среды и биологических тканях.

Подготовка пробы: удаление свободной и обменной фракций трития

Первым этапом анализа содержания ОСТ в объектах окружающей среды и биологических тканях является подготовка пробы: отделение неорганически связанного трития

Варфоломеева Ксения Владимировна

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: varfolomeeva_k@mail.ru

в свободной воде тканей [7]. Наиболее распространёнными методами являются сублимационная сушка (лиофилизация), термовакуумная десорбция и азеотропная дистилляция. Термовакуумная десорбция позволяет сократить время пробоподготовки с нескольких дней до 2–3 часов [7, 8].

После удаления TFWT высушенный и измельчённый образец подвергают дополнительной обработке для исключения E-OBT. Стандартная процедура включает выдерживание сухого материала в нетритированной воде при комнатной температуре для достижения полного изотопного обмена между лабильным водородом образца и водой с последующей повторной сушкой [5, 7]. Данный этап критически важен, однако следует учитывать риск частичного расщепления органических молекул при длительной водной выдержке [5, 9]. Выделенная таким образом фракция NE-OBT является репрезентативной мерой долгосрочного накопления трития.

Методы перевода ОСТ в форму НТО

Термическое сжигание в трубчатой печи с катализатором

Данный метод нашел наибольшее распространение. Образец массой 4–8 г (биота) сжигают в атмосфере кислорода при температуре 600–850 °C в присутствии катализатора (CuO или Pt-Al₂O₃). Образующаяся вода улавливается в холодных ловушках [10, 11]. Выход восстановленного трития зависит от исходного образца и составляет 86–93 %. Для биоты разработаны усовершенствованные системы с трёхзонным контролем температуры и двухстадийной подачей воздуха, позволяющие сократить продолжительность обработки образца при сохранении выхода восстановленного трития на уровне 85–93 % [11].

Гипербарическое окислительное автоклавирование

Данный метод является инновационным и предназначен для образцов с высоким содержанием органики. Позволяет сжигать до 10 г материала при давлении кислорода 1,5–2 МПа, обеспечивая восстановление трития более 98 % [8]. Преимущество метода заключается в возможности анализа крупных проб, что методически важно при низких пределах обнаружения.

Мокрое окисление и метод Парра

Данный метод рассматривается как альтернатива термическому сжиганию. Органическое вещество окисляют растворами сильных окислителей (KMnO₄, Na₂O₂) с последующей перегонкой. Метод Парра основан на быстром окислении в стальном автоклаве под давлением кислорода с воспламенением; не требует дополнительной очистки полученной воды [12].

Масс-спектрометрия ³He

Масс-спектрометрия обладает высочайшей из всех известных методов чувствительностью и применима для измерения фоновых концентраций. Пробу ОСТ герметизируют и выдерживают несколько месяцев для накопления ³He – продукта распада трития – после чего измеряют на масс-спектрометре [12]. Время непосредственного анализа составляет около 30 минут. Недостаток – длительная выдержка.

Измерения

Конденсат НТО, полученный после окисления, смешивают со сцинтилляционной жидкостью и измеряют методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии. Эффективность счёта зависит от степени гашения пробы; для каждого вида пробы, содержащей ОСТ, строят калибровочные кривые по параметру гашения SQP(E). Минимальная детектируемая активность может достигать 0,5–3,4 Бк/кг сухого вещества [9].

Основные источники погрешностей и проблемы валидации:

К основным источникам погрешностей относятся:

1. Изотопное фракционирование, приводящее к систематической ошибке 5–50 % [9].
2. Лабораторное загрязнение при повышенном содержании трития в лабораторных помещениях [13].
3. Водная выдержка может растворять часть органических молекул, искажая результаты [8].
4. Сложности градуировки [8, 10].

Заключение

Современные подходы к определению ОСТ в объектах окружающей среды и биологических тканях представляют собой многоступенчатый процесс, включающий удаление TFWT и обменного трития, количественное окисление (термическое, гипербарическое, мокрое или масс-спектрометрическое) и измерение методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии. Основными проблемами остаются изотопное фракционирование, отсутствие стандартных образцов и риск лабораторного загрязнения исследуемых проб. Перспективными направлениями в определении содержания ОСТ являются разработка экспресс-методов удаления TFWT, внедрение гипербарических систем и проведение регулярных межлабораторных сличений.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Варфоломеева К.В. провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала промежуточный и окончательный вариант рукописи.

Зеленцова С.А. провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала промежуточный и окончательный вариант рукописи.

Седнев К.А. провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Разин К.А. провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Репин В.С. является научным руководителем отраслевой НИР, определил план написания статьи, цели и задачи, провел поиск и анализ литературных данных, написал черновик и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения НИР: «Исследование и радиационно-гигиеническая оценка содержания органических форм трития и углерода-14 в объектах окружающей среды и морепродуктах».

Литература

1. IAEA Comprehensive Report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Vienna: IAEA, 2023. 129 p.
2. Попова А.Ю., Романович И.К., Репин В.С. и др. Обеспечение радиационной безопасности населения дальневосточных регионов Российской Федерации в условиях долговременного сброса воды с АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 7-23. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-23.
3. Koranda J.J., Martin J.R. The movement of tritium in ecological systems // Nu-clear Science Abstracts. 1972. Vol. 26. P. 430-455.
4. Антонова Е.В., Антонов К.Л., Васянович М.Е. и др. Тритий от молекулы до биосферы. 1. Закономерности поведения в окружающей среде // Экология. 2022. № 4. С. 255-288.
5. Гурьев Д.В., Кочетков О.А., Барчуков В.Г. и др. Биологические эффекты органических и неорганических соединений трития // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 2. С. 5-10.
6. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Кузнецова Л.И. и др. Нормативно-методическое обеспечение контроля содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды (современное состояние проблемы) // АНРИ. 2018. № 3(94). С. 8-16.
7. Krištof R., Čipánovska N., Kožar Logar J. Determining the amounts of organically bound tritium and radiocarbon using a combined preparation step and liquid scintillation spectrometry // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2023. Vol. 332. P. 1521-1526. DOI: 10.1007/s10967-022-08586-6.
8. Baglan N., Kim S.B., Cossonnet C. et al. Organically bound tritium (OBT) behaviour and analysis: outcomes of the seminar held in Balaruc-les-Bains in May 2012 // Radioprotection. 2013. Vol. 48, No. 1. P. 127-144. DOI: 10.1051/radiopro/2012051).
9. Le Goff P., Fromm M., Vichot L. et al. Isotopic fractionation of tritium in biological systems // Environment International. 2014. Vol. 65. P. 116-126. DOI: 10.1016/j.envint.2013.12.020.
10. Nayak S.R., D'Souza R.S., Kamath S.S. et al. Organically bound tritium: optimization of measurements in environmental matrices by combustion method and liquid scintillation spectrometry // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2019. Vol. 319. P. 917-926.
11. Pointurier F., Baglan N., Alanic G. et al. Determination of organically bound tritium background level in biological samples from a wide area in the south-west of France // Journal of Environmental Radioactivity. 2003. Vol. 68. P. 171-189.
12. Assessment of Organically-Bound Tritium (OBT) Dispersion in Cardiff Bay / University of Southampton. URL: <https://eprints.soton.ac.uk/464953/1/895136.pdf> (Дата обращения: 02.04.2026).
13. Тритий. Теория, практика, последствия : монография / Л. Г. Бондарева, М.Я. Чеботина, С.Ю. Артамонова, И.Г. Тананаев. Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2024. 359 с.

Поступила: 15.04.2026

Варфоломеева Ксения Владимировна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: varfolomeeva_K@mail.ru; ORCID: 0009-0008-3483-806X, РИНЦ Author ID: 654759

Зеленцова Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0005-2244-0028, РИНЦ Author ID: 700456

Седнев Константин Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0006-7906-1106, РИНЦ Author ID: 1245560

Разин Кирилл Александрович – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; ORCID: 0009-0005-9897-0930, РИНЦ Author ID: 649799

Для цитирования: Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Разин К.А., Репин В.С. Современные подходы к определению содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды и биологических тканях // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 140–144. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-140-144

Modern approaches to the determination of organically bound tritium in environmental media and biological tissues

Kseniya V. Varfolomeeva, Svetlana A. Zelentsova, Konstantin A. Sednev, Kirill A. Razin, Victor S. Repin

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

The prolonged discharge of tritium-containing water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Pacific Ocean leads to the gradual transport of tritium into Russian fishing zones and its accumulation in marine products. Tritium is incorporated into organic compounds, including seafood. Upon consumption of these seafood products, dose coefficients for organically bound tritium forms exceed those for tritiated water forms. Monitoring of organically bound tritium constitutes a critical component of radiological surveillance and the assessment of internal exposure doses. The purpose of this communication is to summarize current approaches to determining organically bound tritium in environmental media and biological tissues. Based on an analysis of scientific publications, this communication provides brief information on established and currently used methods for preparing counting samples to measure the content of organic tritium compounds in environmental media and biological tissues. Conclusion: Modern methods for determining organically bound tritium provide reliable data but are complex and require standardization. Promising directions for determining organically bound tritium content include improving sample preparation, enhancing the efficiency of converting organically bound tritium into a measurable form, implementing more sensitive analytical methods, and developing a metrological assurance system.

Key words: Fukushima Daiichi NPP, radioactive water discharge, organically bound tritium (OBT), seafood, monitoring methods, radiation safety, population.

Authors' personal contribution

Kseniya V. Varfolomeeva conducted the literature search and analysis, and edited the interim and final versions of the manuscript.

Svetlana A. Zelentsova conducted the literature search and analysis, and edited the interim and final versions of the manuscript.

Konstantin A. Sednev conducted the literature search and analysis, and edited the interim version of the manuscript.

Kirill A. Razin conducted the literature search and analysis, and edited the interim version of the manuscript.

Victor S. served as the scientific supervisor of the branch research project, defined the manuscript writing plan, aims and objectives, conducted the literature search and analysis, drafted the manuscript, and prepared the final version for journal submission.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest in conducting the work and preparing this article.

Sources of funding

The article was prepared as part of the research project: "Investigation and radiological-hygienic assessment of the content of organic forms of tritium and carbon-14 in environmental objects and seafood".

References

1. IAEA. Comprehensive Report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Vienna: IAEA; 2023. 129 p.
2. Popova AY, Romanovich IK, Repin VS, Varfolomeeva KV, Zelentsova SA, Sednev KA, et al. Ensuring radiation safety of the population of the Far Eastern regions of the Russian Federation under conditions of long-term discharge of water from the Fukushima-1 NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026;19(1): 7-23. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-23.
3. Koranda JJ, Martin JR. The movement of tritium in ecological systems. *Nuclear Science Abstracts*. 1972;26: 430-455.
4. Antonova EV, Antonov KL, Vasyanovich ME, Panchenko SV. Tritium from molecule to biosphere. 1. Regularities of behavior in the environment. *Ekologiya = Ecology*. 2022;(4): 255-288. (In Russian).
5. Guryev DV, Kochetkov OA, Barchukov VG, Osipov AN. Biological effects of organic and inorganic tritium compounds. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020;65(2): 5-10. (In Russian).
6. Barchukov VG, Kochetkov OA, Kuznetova LI, Kabanov DI, Surin PP. Regulatory and methodological support for control of organic compounds of tritium content in environmental objects (current state of the problem). *ANRI = Apparatus and news of radiation measurements*. 2018;3(94): 8-16. (In Russian).
7. Krištof R, Chipanovska N, Kožar Logar J. Determining the amounts of organically bound tritium and radiocarbon using a combined preparation step and liquid scintillation spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2023; 332. P. 1521-1526. DOI: 10.1007/s10967-022-08586-6.
8. Baglan N, Kim SB, Cossonnet C, Croudace IW, Fournier M, Galeriu D, et al. Organically bound tritium (OBT) behaviour and analysis: outcomes of the seminar held in Balaruc-les-Bains in May 2012. *Radioprotection*. 2013;48(1): 127-144. DOI: 10.1051/radiopro/2012051.
9. Le Goff P, Fromm M, Vichot L, Badot P-M, Guétat P. Isotopic fractionation of tritium in biological systems. *Environment International*. 2014;65(2): 116-126. DOI: 10.1016/j.envint.2013.12.020.

Kseniya V. Varfolomeeva

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

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

10. Nayak SR, D'Souza RS, Kamath SS, Mohan MP, Bharath S, Trilochana Sh, et al. Organically bound tritium: optimization of measurements in environmental matrices by combustion method and liquid scintillation spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2019;319: 917-926.
11. Pointurier F, Baglan N, Alanic G, Chiappini R. Determination of organically bound tritium background level in biological samples from a wide area in the south-west of France. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003;68: 171-189.
12. University of Southampton. Assessment of Organically-Bound Tritium (OBT) Dispersion in Cardiff Bay. Available from: <https://eprints.soton.ac.uk/464953/1/895136.pdf> [Accessed 02 April 2026].
13. Tritium. Theory, practice, consequences: monograph / Bondareva LG, Chebotina M Ya, Artamonova S Yu, Tananaev I G Apatity: Publishing House of the Kola Science Centre; 2024. 359 p.

Received: April 15, 2026

For correspondence: Kseniya V. Varfolomeeva – Research Fellow, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia, E-mail: Varfolomeeva_K@mail.ru); ORCID: 0009-0008-3483-806X, RSCI Author ID: 654759

Svetlana A. Zelentsova – Research Fellow, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0005-2244-0028, RSCI Author ID: 700456

Konstantin A. Sednev – Junior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0006-7906-1106, RSCI Author ID: 1245560

Kirill A. Razin – Acting Junior Research Fellow of the Ecology Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0005-9897-0930, RSCI Author ID: 649799

For citation: Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Razin K.A., Repin V.S. Modern approaches to the determination of organically bound tritium in environmental media and biological tissues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 140–144. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-140-144

Ирина Александровна Звонова: к юбилейной дате



2 марта 2026 года отметила свой 80-летний юбилей Ирина Александровна Звонова – доктор технических наук, кандидат биологических наук, главный научный сотрудник ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Ирина Александровна пришла в институт радиационной гигиены в 1969 году, сразу после окончания физического факультета Ленинградского государственного университета, в лабораторию защиты, возглавляемую на тот момент будущим профессором И.А. Лихтарёвым. Её научная деятельность началась с участия в уникальном клиническом исследовании на добровольцах по применению стабильного йода для защиты человека от воздействия радиоактивного йода-131, которое было организовано и возглавлялось будущим академиком Л.А. Ильиным. В течение полутора десятилетий биофизик И.А. Звонова занималась экспериментальными исследованиями метаболизма радиоизотопов йода в организме человека и животных, дозиметрической оценкой радиационного воздействия радиоизотопов йода. Ею были получены оригинальные данные по параметрам метаболизма йода в организме человека, влияния стабильного йода на оценку дозы и блокаду щитовидной железы в аварийных ситуациях; впервые количественно оценено отщепление метки в организме пациентов после введения радиофармацевтических препаратов, меченных I-131. Проведенные исследования были обобщены в диссертационной работе «Радиационно-гигиенические характеристики радиоизотопов йода и меченных ими соединений», за которую И.А. Звоновой в 1983 году была присвоена ученая степень кандидата биологических наук по специальности «Гигиена».

С первых дней аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году И.А. Звонова активно занималась мониторингом радиационной обстановки и оценкой медицинских последствий аварии для населения загрязнённых территорий России. Под её руководством и непосредственном участии были собраны материалы, разработана методика и оценены дозы облучения щитовидной железы для населения всех областей, загрязнённых радиоактивными выпадениями. Эти оценки доз, опубли-

кованные в виде справочников, используются до настоящего времени для проведения эпидемиологических исследований связи заболеваний жителей раком щитовидной железы с полученной дозой и для прогноза дополнительной заболеваемости в будущем. Материалы чернобыльских исследований послужили основой для докторской диссертации «Реконструкция доз и оценка риска облучения населения России радиоактивным йодом Чернобыльской аварии», за которую в 2004 году ей была присуждена ученая степень доктора технических наук.

Работы И.А. Звоновой в области постчернобыльской дозиметрии и эпидемиологии получили признание в нашей стране и за рубежом, что подтверждается большим списком публикаций её работ в отечественных и зарубежных изданиях. Международные организации ВОЗ и МАГАТЭ неоднократно привлекали её в качестве эксперта по вопросам дозиметрии и экологии радионуклидов йода. Результаты её работ вошли в доклады МАГАТЭ и НКДАР ООН, докладывались на многих международных и российских научных форумах, нашли практическое применение в разработке методических документов Роспотребнадзора и Минздрава РФ, использовались при подготовке официальных справок для Правительства России по оценке радиационной обстановки и доз облучения населения из зоны Чернобыльской аварии в РФ.

В 2011 году её опыт и знания были востребованы в связи с аварией на японской АЭС «Фукусима-1» и внесли существенный вклад при подготовке методических документов Роспотребнадзора, были использованы в международных проектах ВОЗ и НКДАР ООН по оценке доз у населения Японии.

С 2007 года И.А. Звонова вернулась к вопросам радиационной защиты в ядерной медицине. В течение короткого периода времени ею был собран большой массив данных по оценкам доз пациентов и персонала. Сбор и анализ этих данных был особенно важен в тот период из-за активного внедрения новых методов радионуклидной диагностики с использованием аппаратуры ОФЭКТ, ПЭТ, ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ. И.А. Звонова принимала активное участие в совершенствовании методов обеспечения радиационной безопасности в ядерной медицине и разработке актуальных нормативно-методических документов. Дальнейшая работа в этом направлении под научным руководством И.А. Звоновой привела её диссертантку Л.А. Чилига к успешной защите докторской диссертации на тему «Научное обоснование совершенствования системы радиационной защиты в ядерной медицине».

Ирина Александровна Звонова – высокопрофессиональный, преданный своему делу ученый. Она является автором и соавтором около 250 печатных работ. Её визитной карточкой является трудолюбие, ответственность и умение довести до конца любую работу. Она помогает осваивать профессию молодым сотрудникам Института, руководит подготовкой дипломных работ и текущей работой, активный член редколлегии журнала «Радиационная Гигиена». В коллективе Института её уважают и любят за дружелюбие, отзывчивость, честность и порядочность.

От всей души поздравляем Ирину Александровну с юбилеем! Желаем крепкого здоровья, благополучия, оптимизма, неиссякаемой энергии, дальнейших творческих успехов и воспитания достойной смены молодых ученых в области радиационной гигиены!

Виктор Степанович Репин: к 80-летию юбилею



28 апреля 2026 года исполнилось 80 лет Виктору Степановичу Репину – доктору биологических наук, руководителю отдела здоровья, заведующему лабораторией экологии Федерального бюджетного учреждения 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.

В сентябре 1963 года Виктор Степанович Репин поступил в Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина), ныне СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Уже на втором курсе, в 1965 году, он начал работать техником-дозиметристом в Ленинградском научно-исследовательском институте радиационной гигиены (ЛенНИИРГ). После окончания ЛЭТИ Репин Виктор Степанович продолжил работу в ЛенНИИРГе, сначала в должности инженера-физика, затем младшего научного сотрудника, а позже – старшего научного сотрудника. За время работы в ЛенНИИРГе Виктор Степанович приобрел уникальный опыт в области дозиметрии внутреннего облучения, проведении экспериментальных исследований, моделировании обмена радионуклидов у млекопитающих. Серия экспериментальных исследований завершилась подготовкой кандидатской диссертации «Разработка методов контроля радиационной безопасности при работе с плутонием (на основе использования комплексонов)», которая была успешно защищена в 1982 году с присвоением ученой степени кандидата технических наук. Начиная с 1986 года, после аварии на Чернобыльской АЭС,

Виктор Степанович Репин принимал активное участие в оценке состояния радиационной обстановки и оценке доз внутреннего облучения населения Юго-Западных районов Брянской области. За самоотверженный труд и личный вклад в ликвидацию последствий аварии на Чернобыльской АЭС Виктор Степанович был отмечен государственной наградой.

В 1988 году Виктор Степанович по приглашению министерства здравоохранения Украины был переведен на работу во вновь созданный Всесоюзный научный центр радиационной медицины в г. Киев на должность руководителя лаборатории косвенных и расчетных методов дозиметрии. Основными научными интересами Репина Виктора Степановича стали вопросы ретроспективного восстановления доз облучения жителей, эвакуированных из 30-км зоны Чернобыльской АЭС. Под руководством Виктора Степановича были разработаны методические подходы к ретроспективной оценке доз внешнего и внутреннего гамма- и бета-облучения, а также подходы к оценке доз облучения от ингаляционного поступления радионуклидов. Полученные результаты легли в основу докторской диссертации «Радиационно-гигиеническое значение источников и доз облучения населения 30-км зоны после аварии на ЧАЭС (Проблемы реконструкции, оценка рисков)», защищенной в 1995 году с присуждением степени доктора биологических наук. За годы работы во Всесоюзном научном центре радиационной медицины г. Киева под руководством Виктора Степановича было подготовлено 5 кандидатов наук.

В 2001 году Виктор Степанович Репин вернулся к работе в Институте радиационной гигиены. Предметом его научной деятельности стали вопросы радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения мирных ядерных взрывов, совершенствование методов контроля природных и техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды, исследование содержания трития в морской воде дальневосточных регионов Российской Федерации, вопросы радиозащиты, инициировал создание на базе института автоматизированной системы контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора. С 2007 по 2010 год Виктор Степанович занимал должность заместителя директора по научной работе, а с 2011 года по настоящее время является руководителем отдела здоровья и заведующим лабораторией экологии. Виктор Степанович является членом редколлегии журнала «Радиационная гигиена».

Виктор Степанович участвовал в разработке многих нормативно-методических документов, в том числе НРБ и ОСПОРБ, является автором и соавтором более 200 научных работ. Награжден орденом «Знак почета», Благодарственным письмом Президента Российской Федерации, грамотой Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации, Благодарностью руководителя Роспотребнадзора. За успехи в развитии радиационной гигиены награжден памятной медалью имени профессора П.В. Рамзаева. Виктор Степанович Репин завоевал авторитет и уважение в коллективе института.

Коллектив Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева, редколлегия журнала «Радиационная гигиена», сотрудники лаборатории экологии и ученики от всей души поздравляют юбиляра, желают ему крепкого здоровья, семейного благополучия, оптимизма, неиссякаемой энергии, новых достижений в области радиационной гигиены и успехов в воспитании молодых ученых!

Правила для авторов журнала «Радиационная гигиена»

Настоящие правила разработаны на основе рекомендаций Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России, Международного комитета редакторов медицинских журналов (International Committee of Medical Journal Editors, ICMJE), Международной инициативной группы по повышению качества и прозрачности медицинских исследований ЭКВАТОР (Enhancing the Quality and Transparency of Health Research (EQUATOR) Network), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ).

Прежде чем направлять статью в редакцию журнала, пожалуйста, внимательно ознакомьтесь со следующими материалами:

- Тематической направленностью и рубриками журнала, указанными в разделе «Информация о журнале», на сайте журнала в сети Интернет.

- Положением о принципах редакционной этики журнала. Журнал придерживается принципов редакционной этики The Committee on Publication Ethics (COPE).

Фактом подачи статьи авторы подтверждают, что они согласны с перечисленными ниже положениями и принципами.

Принимаются оригинальные научные статьи на русском и английском языках, соответствующие профилю журнала «Радиационная гигиена» и отражающие результаты оригинальных научных исследований авторов, экспериментальные, теоретические статьи, аналитические обзоры, статьи по радиационным измерениям, статьи по ЕСКИД и радиационно-гигиенической паспортизации, краткие сообщения, дискуссионные статьи, рецензии на работы по актуальным вопросам радиационной гигиены, письма в редакцию.

Журнал принимает материалы от аспирантов, соискателей, докторантов, специалистов и экспертов в данной области.

РЕКОМЕНДАЦИИ АВТОРУ ДО ПОДАЧИ СТАТЬИ

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!*

- Редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи. Все статьи, поступающие в редакцию журнала, проходят двойное слепое рецензирование.

- Редакция оставляет за собой право на сокращение и редактирование присланных статей. Датой поступления статьи считается время поступления окончательного (переработанного) варианта статьи в случае её доработки авторами после рецензирования.

- 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.

- Редакция журнала «Радиационная гигиена» рекомендует авторам использовать при подготовке оригинальных статей и других материалов следующие чек-листы и схемы, разработанные международными организациями в области здравоохранения (EQUATOR, Enhancing the Quality and Transparency of Health Research).

При подготовке **статей, отражающих результаты рандомизированных клинических исследований** – «CONSORT 2010 checklist of information to include when reporting a randomized trial».

При подготовке **статей, отражающих результаты неэкспериментальных исследований** – «The Strengthening of Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) Statement: guidelines for reporting observational studies».

При подготовке **систематических обзоров** – «PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)».

При подготовке **описания клинических случаев** – «The CARE Guidelines: Consensus-based Clinical Case Reporting Guideline Development».

При подготовке **статей, отражающих результаты качественных исследований** – «SRQR (Standards for reporting qualitative research)».

При подготовке **статей, отражающих результаты прогнозистических исследований** – STARD 2015: An Updated List of Essential Items for Reporting Diagnostic Accuracy Studies.

- Объем обзорных аналитических, исторических статей не должен превышать 35 страниц машинописного текста, оригинальных исследований – 25 страниц, дискуссионных статей – 10 страниц, 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)**. Приводятся на русском и английском языках.

На русском языке при указании авторов статьи фамилию следует указывать до инициалов имени и отчества (Иванов П.С., Петров С.И., Сидоров И.П.).

На английском языке при указании авторов статьи используется формат «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan P. Ivanov). Фамилии на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного паспорта и/или публикаций, фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru.

Любые изменения в списке авторов после подачи статьи в редакцию должны быть одобрены всеми авторами.

- **Аффилиация автора (авторов)**.

Наименование учреждений: полное официальное название организации, включая индекс, город и страну). Авторам необходимо указывать все места работы, имеющие отношение к проведению исследования.

Если в подготовке статьи принимали участие авторы из разных учреждений, необходимо указать принадлежность каждого автора к конкретному учреждению с помощью надстрочного индекса.

Необходимо официальное англоязычное название учреждения для блока информации на английском языке.

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 200–250 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:** ставится научная проблема и цель статьи. Эта структурная часть резюме словом «Введение» не предваряется. Цель статьи следует предварить словами «Цель исследования: ...».

– **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 статей типа обзор, лекция, дискуссия резюме должно включать краткое изложение основной концепции статьи, то есть, 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.

– **Ключевые слова.** В конце титульного листа приводятся **ключевые слова или словосочетания на русском и английском языках** (не более 8) в порядке значимости. Исключение допускается для случаев использования устойчивого (общепринятого) сочетания двух или нескольких слов для обозначения термина или понятия. Например: «эффективная доза», «амбиентный эквивалент дозы», «эффективная удельная активность». В этом случае такое сочетание расценивается как одно ключевое слово. **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

В журнале принят формат IMRAD (Introduction, Methods, Results and Discussion, Conclusion).

Текст оригинального научного исследования должен состоять из выделяемых заголовками разделов: «Введение», «Цель исследования», «Задачи исследования», «Материалы и методы», «Результаты исследования», «Обсуждение», «Заключение».

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. Необходимо описать основные современные исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы. Желательно рассмотреть 20–40 источников и сравнить взгляды авторов; часть источников должна быть англоязычной. Важно провести сравнительный анализ с зарубежными публикациями по заявленной проблематике. Во введении ставится **Цель статьи**, которая вытекает из постановки научной проблемы.

– 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, фамилии, инициалы больных или номера историй болезни не используются, особенно на рисунках или фотографиях. Для оригинального исследования необходимо указать информацию об одобрении протокола исследования комитетом по этике (с указанием номера документа, даты его подписания и официального наименования комитета). Для статей с оригинальными исследованиями и обзорами клинических случаев необходимо указать информацию о наличии информированного согласия пациентов.

При использовании в исследовании лабораторных животных необходимо указать, соответствовал ли протокол исследования нормам проведения биомедицинских исследований с участием животных (пример):

Соблюдение правил биоэтики

Протокол исследования одобрен комитетом по биомедицинской этике (название учреждения первого автора).

Исследование выполнено в соответствии с этическими нормами обращения с животными, принятыми Европейской конвенцией по защите позвоночных животных, используемых для исследовательских и иных научных целей.

Все радиационные единицы следует приводить в международной системе единиц измерения (СИ) (см.: ГОСТ – 8.417-2002. Единицы величин). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

При описании методики исследования можно ограничиться указанием на существо применяемого метода со ссылкой на источник заимствования, в случае модификации – указать, в чем конкретно она заключается. Оригинальный метод должен быть описан полностью.

– **Результаты (Results).** Результаты и обсуждения предпочтительно излагать в разных разделах.

Результаты должны быть ясными и лаконичными. Экспериментальные данные следует представлять в абсолютных числах и в процентах, должны быть указаны 95 % довери-

тельный интервал (95 CI %) и уровень достоверности различных p . Планки погрешностей требуются на всех точках экспериментальных и расчетных данных с объяснением в тексте того, каким образом эти погрешности были установлены. 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. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках. Нужно указать, являются ли приводимые числовые значения первичными или производными, привести пределы точности, надёжности, интервалы достоверности, оценки, рекомендации, принятые или отвергнутые гипотезы, обсуждаемые в статье.

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 должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком и вставляется в текст сразу после ссылки на нее. Следует уточнить, какие параметры статистической вариативности оценивались, например: стандартное отклонение или стандартная ошибка среднего. Не следует дублировать данные, содержащиеся в таблице, в тексте статьи, в графиках или диаграммах.

Таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В таблице 3 представлены ...» или «Полученные результаты ... (табл. 3)». Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и ее название (к примеру: «Таблица 2. Параметры модели»). Выравнивается по центру страницы. Точка после заголовка таблицы не ставится. Название таблицы и ее структурные элементы должны быть переведены на английский язык. Перевод заключают в квадратные скобки. Перевод (к примеру: «[Table 2. Parameters of the model]») располагают с новой строки после заголовка таблицы на русском языке с выравниванием по центру.

Рисунки должны быть четкие, контрастные. Все рисунки должны иметь подписанные подписи. Подписуемая подпись должна быть переведена на английский язык. Подписуемые подписи должны быть размещены в основном тексте. Перед каждым рисунком в тексте обязательно должна быть ссылка. Рисунки нумеруются арабскими цифрами по порядку следования в тексте. Если рисунок в тексте один, то он не нумеруется. В тексте отсылка на рисунок оформляется следующим образом:

«На рисунке 5 продемонстрирована ...» или «График зависимости ... (рис. 5)». Подписуемая подпись включает порядковый номер рисунка и его название (к примеру: «Рис. 2. Динамика изменения ...»). Выравнивается по центру. Точка после подписуемой подписи не ставится. Перевод подписуемой подписи заключают в квадратные скобки (к примеру: «[Fig. 2. Dynamics ...]») и располагают с новой строки после подписуемой подписи на русском языке с выравниванием по центру.

Цифровые версии иллюстраций должны быть сохранены в отдельных файлах в формате TIFF или JPEG, с разрешением не менее 300 dpi и последовательно пронумерованы.

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. В подписях к микрофотографиям, электронным микрофотографиям обязательно следует указывать метод окраски.

Формулы следует нумеровать только в том случае, если на них в тексте статьи даются ссылки. Номер формулы и ссылка на нее в тексте обозначаются арабскими цифрами в круглых скобках (к примеру, «... в соответствии с выражением (1) ...»). Единственная формула не нумеруется.

Все названия, подписи и структурные элементы таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках. Перевод заключается в квадратные скобки.

– **Обсуждение (Discussion).** В Обсуждении даётся убедительное объяснение результатов и показывается их значимость. В случае проведения вычислительных исследований, полученные результаты должны быть сопоставлены с информацией из опубликованных экспериментальных работ, если подобное возможно. Нужно указать, являются ли приводимые числовые значения первичными или производными, привести пределы точности, надёжности, интервалы достоверности, оценки, рекомендации, принятые или отвергнутые гипотезы, обсуждаемые в статье. В обсуждении включается абзац, в котором прямо упоминаются ограничения исследования. Ограничения исследования — это четкое ограничение возможностей применения выбранных методов исследования, характеристик объектов исследования, однозначность контекста, границ рассматриваемого предмета эксперимента. Кроме критерия предметных лимитов к важным ориентирам и ограничениям научного исследования относят также этические и социокультурные запреты.

– **Заключение (Conclusion).** Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде приводятся главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

В конце статьи должны быть размещены следующие данные:

– **Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей (Authors' personal contribution).** Наш журнал придерживается следующих критериев авторства, разработанных ICMJE и COPE:

Журнал «Радиационная гигиена» принимает следующие критерии авторства:

1) существенный вклад в разработку концепции или плани-

рование 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 (Acknowledgments).** В этом разделе выражают благодарность людям, которые участвовали в работе над статьей, но не являются ее авторами. Участие в работе над статьей подразумевает: рекомендации по совершенствованию исследования, предоставление пространства для исследования, ведомственный контроль, получение финансовой поддержки, одиночные виды анализа, предоставление реагентов/пациентов/животных/прочих материалов для исследования.

Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Приводятся на русском и английском языках.

– **Информация об авторе (авторах).** В этом разделе перечисляются звание, должность, иные регалии. Здесь также указывается e-mail и полный почтовый адрес ответственного автора.

– **Информация о конфликте интересов (Conflict of interests).** Конфликт интересов – это условия, при которых у людей возникают вступающие в конфликт или конкурирующие интересы, способные повлиять на принятие редакторского решения. Конфликты интересов могут быть потенциальными или осознанными, а также реально существующими. На объективность могут повлиять личные, политические, финансовые, научные или религиозные факторы.

Автор обязан уведомить редактора о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию о конфликте интересов в соответствующий раздел статьи.

Если конфликта интересов нет, автор должен также сообщить об этом. Пример формулировки: «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

Приводится на русском и английском языках.

– **Сведения об источнике финансирования (Sources of funding).** Необходимо указать, получала ли работа финансовую поддержку, и в случае наличия финансирования – его источник (гранты, оборудование, медикаменты и/или иная поддержка, способствовавшая проведению описанной в статье работы или написанию самой статьи).

Приводятся на русском и английском языках.

– **Список литературы.** Рекомендованное количество литературных источников: для оригинальных научных статей – не менее 25 источников, для лекций и обзоров – не более 35 источников, для других статей – не более 15 источников.

Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.

Приводятся на русском и английском языках.

Прилагаются **два списка литературы: «Литература» и «References».**

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 51772.12001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

Подстрочные ссылки (сноски):

¹СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

¹МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 "Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations". Moscow, Rospotrebnadzor, 2011, 40 p. (In Russ.)]

Ниже приведены **примеры библиографических ссылок для первого списка литературы.**

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 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., Синицын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии // Russian Electronic Journal of Radiology. 2018. Т. 8, № 3. С. 60–73. DOI: 10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

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.

Ниже приведены **примеры библиографических ссылок для второго списка литературы.**

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 ¹³⁷Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105–113.

Vodovатов AV, Chipiga LA, Piven PA, Trufanov GE, Berkovich GV, Mashchenko IA, et al. Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 126–135. (In Russian).

Morozov SP, Kuzmina ES, Vetsheva NN, Gombolevisky VA, Lantukh ZA, Polishuk NS, et al. Moscow Screening: Lung Cancer Screening With Low-Dose Computed Tomography. *Problemy sotsialnoy gigiyeny, zdavookhraneniya i istorii meditsiny = Problems of social hygiene, health care and history of medicine*. 2019;27(Special Issue): 630–636. (In Russian). DOI: 10.32687/0869-866X-2019-27-si1-630-636.

Статья в электронном журнале:

Errami M, Garner H. A tale of two citations. *Nature*. 2008;451(7177): 397–399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. *Chronicle of Higher Education*. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

Статья в электронном журнале с DOI:

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanagan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. *American Journal of Sports Medicine*. 2012;40(12): 2872–2878. Available from: <http://ajs.sagepub.com/content/40/12/2872> DOI: 10.1177/0363546512458223 [Accessed 19 Feb 2013].

Книга (печатная):

Carlson BM. Human embryology and developmental biology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2009. 541 p.

Книга (электронная):

Shreeve DF. Reactive attachment disorder: a case-based approach. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-1647-0> [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 Nov 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, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211–216.

Стандарт:

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Structural fire design. London: BSI; 2005.

Методические рекомендации/руководство:

National Institute for Health and Care Excellence (NICE), Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-1837390683589> [Accessed 27 May 2017].

– **Сведения об авторах.** После списка 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, адрес электронной почты

всех авторов, идентификационный номер ORCID. Сокращения не допускаются.

Приводятся на русском и английском языках.

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 4.0 License (CC BY 4.0) которая позволяет другим распространять данную работу с обязательным сохранением ссылок на авторов оригинальной работы и оригинальную публикацию в этом журнале.

– Все авторы внимательно прочитали Этику научных публикаций журнала и с пониманием воспримут санкции за его нарушение.

– Авторы статьи принимают положения: «Авторское соглашение (публичная оферта) о публикации статьи в научном журнале «Радиационная гигиена».

– Согласно вступившей в действие IV части Гражданского кодекса РФ, между авторами статей и редакцией журнала заключается **Лицензионный договор (оферта) о предоставлении права использования произведения** издателю.

Полный текст **авторского договора (оферты) размещен на сайте журнала в разделе «Правила для авторов».**

Основным способом подачи рукописи статьи в редакцию является загрузка pdf файлов с текстом статьи через сайт журнала <https://www.radhyg.ru> в форме присоединенных pdf файлов. Вся остальная переписка между редакцией, авторами и рецензентами производится по электронной почте журнала по адресу: 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 информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате TIFF, JPEG с разрешением не менее 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.

Подготовка статей

Для представления статьи авторы должны подтвердить нижеследующие пункты. Рукопись может быть возвращена авторам, если она им не соответствует.

1. Эта статья ранее не была опубликована, а также не представлена для рассмотрения и публикации в другом журнале (или дано объяснение этого в Комментариях для редактора).

2. Файл отправляемой статьи представлен в формате документа OpenOffice, Microsoft Word, RTF или WordPerfect.

3. Приведены полные интернет-адреса (URL) для ссылок там, где это возможно.

4. Текст набран с полуторным межстрочным интервалом; используется шрифт Times New Roman, кегль шрифта - 14 пунктов; для выделения используется курсив, а не подчеркивание (за исключением интернет-адресов); все иллюстрации, графики и таблицы расположены в соответствующих местах в тексте, а не в конце документа.

5. Текст соответствует стилистическим и библиографическим требованиям, описанным в Руководстве для авторов, расположенном на странице «О журнале».

6. Если вы отправляете статью в рецензируемый раздел журнала, то выполнены требования документа Обеспечение слепого рецензирования.

Авторские права

Авторы, публикующие в данном журнале, соглашаются со следующим:

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License, которая позволяет другим распространять данную работу с обязательным сохранением ссылок на авторов оригинальной работы и оригинальную публикацию в этом журнале.

2. Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном здесь виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикацию в книге), со ссылкой на ее оригинальную публикацию в этом журнале.

3. Авторы имеют право размещать их работу в сети Интернет (например, в институтском хранилище или персональном сайте) до и во время процесса рассмотрения ее данным журналом, так как это может привести к продуктивному обсуждению и большому количеству ссылок на данную работу (см. The Effect of Open Access).

Приватность

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных этим журналом, и не будут использованы для каких-либо других целей или предоставлены другим лицам и организациям.

Справки по телефону: (812)233 42 83 и (812)233 50 16 (редакция журнала «Радиационная гигиена»).

ISSN 1998-426X (Print)
ISSN 2409-9082 (Online)