

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 19 № 1, 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 широкодоступного информационного поля для всех специалистов, связанных с радиационной гигиеной и обеспечением радиационной безопасности населения, расширение сферы профессионального диалога для российских и зарубежных исследователей, работающих в этих и смежных областях науки.

**Задачи журнала:**

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

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

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

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

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

Формат 60x84/8. Печать офсетная. 19 печ. л.  
Выход в свет: 30.03.2026

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



## Председатель редакционного совета

**Онищенко Геннадий Григорьевич** — Российская академия образования, заместитель президента, д.м.н., профессор, академик РАН (Москва, Российская Федерация)

## Главный редактор

**Романович Иван Константинович** — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.м.н., профессор, академик РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

## Заместитель главного редактора

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

## Редакционный совет

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

**Башкетова Наталья Семеновна** — Межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу и Ленинградской области (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

**Бузинов Роман Вячеславович** — ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья», д.м.н., доцент, заслуженный врач Российской Федерации (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

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

**Иванов Виктор Константинович** — Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН (Обнинск, Российская Федерация)

**Марченко Татьяна Андреевна** — Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий), д.м.н., профессор (Москва, Российская Федерация)

**Мирсаидов Уамас Мирсаидович** — Агентство по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, д.х.н., профессор, академик АН РТ (Душанбе, Республика Таджикистан)

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

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

**Рыжкин Сергей Александрович** — ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного медицинского образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, д.м.н., доцент (Москва, Российская Федерация)

**Софронов Генрих Александрович** — ФГБНУ «Институт экспериментальной медицины», д.м.н., профессор, академик РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

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

## Редакционная коллегия

**Алехнович Александр Владимирович** — ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, д.м.н., профессор (Москва, Российская Федерация)

**Аклеев Александр Васильевич** — ФГБУН «Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики» ФМБА России, д.м.н., профессор (Озёрск, Российская Федерация)

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

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

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

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

**Гребенюк Александр Николаевич** — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет» Минздрава России, д.м.н., профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

**Санжарова Наталья Ивановна** — ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», член-корреспондент РАН, д.б.н., профессор (Обнинск, Российская Федерация)

**Тахауов Равиль Манихович** — ФГБУН «Северский биофизический научный центр» ФМБА России, д.м.н., профессор (Северск, Российская Федерация)

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

## FOUNDER & PUBLISHER

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

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

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

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

### Objectives:

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

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](mailto:journal@niirg.ru)  
Web: [www.radhyg.ru](http://www.radhyg.ru)

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

Format: 60x84/8.  
Offset printing, 19 printed sheets.  
Publication date: 30.03.2026  
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 № 1, 2026

## Chairman of Editorial Council

**Gennadiy G. Onishchenko** – Russian Academy of Education, Deputy President, M.D., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, (Moscow, Russian Federation)

## Editor-in-Chief

**Ivan K. Romanovich** – Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, M.D., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, (Saint Petersburg, Russian Federation)

## Deputy Editor-in-Chief

**Nadezhda M. Vishnyakova** – Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, M.D. (Saint Petersburg, Russian Federation)

## Members of Editorial Council

**Sergey S. Aleksanin** – Federal State Budgetary Institute "The Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine" of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, M.D., Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Nataliya S. Bashketova** – Interregional Department of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing for the city of St. Petersburg and the Leningrad Region (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

**Viktor K. Ivanov** – A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center - branch of the Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, (Obninsk, Russian Federation)

**Tat'yana A. Marchenko** – All-Russian Research Institute for Civil Defence of the EMERCOM of Russia, M.D., Professor (Moscow, Russian Federation)

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

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

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

**Sergey A. Ryzhkin** – Russian Medical Academy of Continuous Medical Education of the Ministry of Health of the Russian Federation, M.D., Associate Professor (Moscow, Russian Federation)

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

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

## Editorial Board

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

**Aleksandr V. Akleyev** – Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, M.D., Professor (Ozyorsk, Russian Federation)

**Tat'yana B. Baltrukova** – Northwest State Medical University named after I.I. Mechnikov, M.D., Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

**Aleksandr N. Grebenyuk** – State Federal-Funded Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation", M.D., Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

**Mattsson Lars Juhan Sören** – Professor at Department of Medical Radiation Physics, Lund University (Malmö, Sweden)

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

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

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

**Natalya I. Sanzharova** – Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Obninsk, Russian Federation)

**Ravil M. Takhaouov** – Seversk Biophysical Research Center of the Federal Medical Biological Agency, M.D., Professor (Seversk, Russian Federation)

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

## НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Попова А.Ю., Романович И.К., Репин В.С., Варфоломеева К.В.,  
Зеленцова С.А., Седнев К.А., Библин А.М., Будянский М.В.,  
Лебедева М.А., Улейский М.Ю., Белоненко Т.В.

**Обеспечение радиационной безопасности населения  
дальневосточных регионов Российской Федерации  
в условиях долговременного сброса воды  
с АЭС «Фукусима-1»** ..... 7

*Соколова А.Б., Ефимов А.В., Ишунина М.В., Сыпко С.А.*

**Динамика выведения плутония с мочой и калом  
на примере случаев острого ингаляционного  
поступления промышленных соединений  
плутония** ..... 24

*Кожухова Н.А., Балтрукова Т.Б., Арефьева Д.В.*

**Особенности облучения персонала при выполнении  
работ по ремонту атомных морских объектов** ..... 34

*Маткевич Е.И., Ганцовский П.П., Сивенков А.Г., Комаров А.Ю.,  
Юрина И.Л., Цовьянов А.Г., Башков А.Н.*

**Эффективные дозы облучения пациентов при  
компьютерной томографии сочетанных областей  
тела по данным фантомной дозиметрии** ..... 44

*Косарлукова Е.А., Водоватов А.В., Библин А.М.,  
Ахматдинов Р.Р.*

**Методика расчёта эффективных доз при проведении  
рентгенографических процедур как инструмент  
анализа формы №3–ДОЗ** ..... 56

*Купцова П.С., Комарова Л.Н., Ольховая Е.Р., Лапенко А.К.,  
Шкавров С.В., Купцов И.С., Сабуров В.О.*

**Оценка радиопротекторного потенциала фумаровой  
кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола  
ацеглумата при действии  $\gamma$ -излучения, протонов  
и ионов  $^{12}\text{C}$  на клетки человека** ..... 63

*Шацкий И.Г., Дружинина П.С., Чипига Л.А., Алексева Д.В.*

**Оценка влияния средств индивидуальной защиты  
на работу программ автоматической модуляции  
силы тока и напряжения при проведении  
компьютерной томографии** ..... 72

*Завьялов Д.А., Крестинина Л.Ю.*

**Риск заболеть солидными злокачественными  
новообразованиями у потомков населения,  
облученного на Южном Урале** ..... 84

*Ефимов А.В., Сокольников М.Э., Соколова А.Б., Ишунина М.В.,  
Аладова Е.Е.*

**Апробация алгоритмов риск-ориентированного  
подхода к контролю профессионального  
внутреннего облучения при поступлении  
соединений плутония** ..... 91

*Голиков В.Ю.*

**Прогноз мощности дозы гамма-излучения  
на основе математических моделей  
миграции  $^{137}\text{Cs}$  в почве** ..... 102

*Финашов Л.В., Востротин В.В.*

**Факторы, влияющие на объёмную активность  
третия в моче жителей Озерска** ..... 113

## RESEARCH ARTICLES

*Popova A.Yu., Romanovich I.K., Repin V.S., Varfolomeeva K.V.,  
Zelentsova S.A., Sednev K.A., Biblin A.M., Budyansky M.V.,  
Lebedeva M.A., Uleysky M.Yu., Belonenko T.V.*

**Radiation safety assurance for the population of the Far  
Eastern regions of the Russian Federation under  
conditions of long-term discharge of water  
from the Fukushima-1 NPP** .....20

*Sokolova A.B., Efimov A.V., Ishunina M.V., Sytko S.A.*

**Dynamics of plutonium excretion with urine  
and feces using cases of acute inhalation intake  
of industrial plutonium compounds  
as an example** .....32

*Kozhukhova N.A., Baltrukova T.B., Arefyeva D.V.*

**The specifics of personnel exposure during  
the repair of nuclear maritime facilities** .....42

*Matkevich E.I., Gantsovsky P.P., Sivenkov A.G., Komarov A.Yu.,  
Yurina I.I., Tsovyanov A.G., Bashkov A.N.*

**Effective radiation doses of patients in computed  
tomography of combined body areas according  
to phantom dosimetry** .....54

*Kosarlukova E.A., Vodovatov A.V., Biblin A.M.,  
Akhmatdinov R.R.*

**Methodology for calculating average effective doses  
in radiography procedures as a tool for analyzing  
Form No. 3-DOZ** .....61

*Kuptsova P.S., Komarova L.N., Olkhovaya E.R., Lapenko A.K.,  
Shkavrov S.V., Kuptsov I.S., Saburov V.O.*

**Evaluation of the radioprotective potential of fumaric  
acid, 3-hydroxypyridine fumarate and deanol  
aceglumate under the action of  $\gamma$ -radiation,  
protons and  $^{12}\text{C}$  ions on human cells** .....69

*Shatsky I.G., Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Alekseeva D.V.*

**Evaluation of the impact of personal protective  
equipment on the automatic exposure control  
system in computed tomography** .....82

*Zavyalov D.A., Krestinina L.Yu.*

**Solid cancer incidence risk in offspring of parents  
exposed in the South Urals** .....89

*Efimov A.V., Sokolnikov M.E., Sokolova A.B., Ishunina M.V.,  
Aladova E.E.*

**Approbation of algorithms for a risk-based approach  
to the control of professional internal  
exposure to plutonium compounds** .....100

*Golikov V.Yu.*

**Forecast of gamma radiation dose rate  
based on mathematical models  
of  $^{137}\text{Cs}$  migration in soil** .....111

*Finashov L.V., Vostrotin V.V.*

**Factors affecting the volume activity of tritium  
in the urine of Ozyorsk residents** .....121

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 19 № 1, 2026

### ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

*Библин А.М.*

Гигиеническая оценка уровней, структуры доз облучения и радиационных рисков населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области ..... 123

### ДИСКУССИИ

*Кормановская Т.А., Кононенко Д.В.*

Проблемные аспекты обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками излучения ..... 131

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

*Рамзаев В.П., Барковский А.Н.*

Сезонные колебания мощности амбиентного эквивалента дозы на улицах Санкт-Петербурга ..... 140

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» ..... 147

## CONTENTS

Vol. 19 № 1, 2026

### ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

*Biblin A.M.*

Radiation doses and radiation risks for the population of Saint Petersburg and Leningrad Oblast ..... 129

### DISCUSSIONS

*Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V.*

Issues of ensuring public radiation safety related to exposure to natural sources of ionizing radiation in the Russian Federation ..... 138

### BRIEF REPORTS

*Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.*

Seasonal variations of ambient dose equivalent rate on the streets of Saint Petersburg ..... 145

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS ..... 147

## Обеспечение радиационной безопасности населения дальневосточных регионов Российской Федерации в условиях долговременного сброса воды с АЭС «Фукусима-1»

Попова А.Ю.<sup>1</sup>, Романович И.К.<sup>2</sup>, Репин В.С.<sup>2</sup>, Варфоломеева К.В.<sup>2</sup>, Зеленцова С.А.<sup>2</sup>, Седнев К.А.<sup>2</sup>, Библин А.М.<sup>2</sup>, Будянский М.В.<sup>3,4</sup>, Лебедева М.А.<sup>3,4</sup>, Улейский М.Ю.<sup>3</sup>, Белоненко Т.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

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

<sup>3</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*В связи с планируемым длительным сбросом воды, содержащей тритий, из АЭС «Фукусима-1» ожидается постепенное повышение его содержания в прибрежных акваториях дальневосточных регионов Российской Федерации. Целью исследования является совершенствование методов обеспечения радиационной безопасности населения в условиях долговременного сброса радиоактивной воды с АЭС «Фукусима-1» на основе численного моделирования циркуляции морских течений. Материалы и методы: Для анализа содержания трития использованы пробы морской воды из прибрежных акваторий Камчатского, Приморского и Хабаровского края, Магаданской и Сахалинской областей, и Чукотского автономного округа за период 2023-2025 гг. Для описания процессов переноса трития применены лагранжевы модели, учитывающие пространственно-временную структуру океанической циркуляции и течений. Результаты исследования и обсуждение: Показано, что средние значения удельной активности трития в пробах, взятых на расстоянии до 1000 м от берега, варьируют от менее 1,0 Бк/кг до 5,5 Бк/кг. Численное моделирование выявило вероятные зоны накопления трития, сбрасываемого с очищенной водой с АЭС «Фукусима-1»: южные Курилы, остров Сахалин, южная оконечность полуострова Камчатка и остров Беринга. Восточно-Камчатское течение формирует динамический барьер вдоль восточного побережья Камчатки, ограничивая проникновение загрязнённых вод в прибрежные районы. Заключение: Для организации эффективного долгосрочного мониторинга трития в морской воде, а впоследствии в морепродуктах, необходимо уточнение районов наиболее вероятного накопления трития в акваториях Дальнего Востока России.*

**Ключевые слова:** АЭС Фукусима-1, тритий, удельная активность, морская вода, моделирование морских течений, Тихий океан, Дальневосточный федеральный округ.

### Введение

В процессе ликвидации последствий аварии, произошедшей в Японии в 2011 году на АЭС «Фукусима-1», компания-оператор Токуо Electric Power Company Holdings (TEPCO), обслуживающая АЭС «Фукусима-1», столкнулась с необходимостью утилизации большого объёма воды (1,37 млн. тонн), очищенной от радионуклидов, за исключением трития (<sup>3</sup>H) [1–3]. Суммарная активность трития в резервуарах на 2020 год составляла 860 ТБк, а удельная активность – 730 кБк/л [4, 5]. Поскольку тритий, входящий в состав молекул воды, не поддается очистке, правительство Японии по согласованию с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) приняло решение разбавлять высокоактивную воду и поэтапно сбрасывать разбавленную воду в Тихий океан в течение 30 лет [6]. Японским национальным законодательством, во взаимодействии с МАГАТЭ, был установлен норматив для объемной активности трития в разбавленной воде перед сбросом, равный 1500 Бк/л, а годовой лимит сброса трития составил 22 ТБк [7]. Первый

сброс воды с тритием с АЭС «Фукусима-1» был выполнен 24 августа 2023 года, а с 11 по 29 сентября 2025 года был проведен пятнадцатый сброс [8]. Объем каждого сброса составлял примерно 8 000 м<sup>3</sup>. Таким образом, наблюдение за концентрацией трития в водах Тихого океана в период сброса является актуальным. Наблюдения за концентрацией трития в окружающей среде, включая моря и океаны, регулярно проводятся разными странами. Обобщенные сведения о содержании трития в окружающей среде до аварии на АЭС «Фукусима-1» содержатся в техническом докладе МАГАТЭ [9]. Согласно данным, представленным в докладе, объемная активность трития в водах Тихого океана в период активных атмосферных ядерных испытаний (1950–1960 гг.) варьировала от долей до единиц Бк/л в зависимости от региона и года наблюдений.

По данным национальных программ мониторинга содержания трития в морской воде в территориальных водах Гонконга, Южной Кореи и Тайваня в 2025 году активность трития составляла ≤1,8 Бк/кг [10], ≤6,8 Бк/кг [11] и ≤9,8 Бк/кг [12] соответственно.

**Репин Виктор Степанович**

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

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

В результате комплексного анализа проб морской воды, отобранных в 2025 году в акватории АЭС «Фукусима-1», ТЕРСО и органами государственной власти Японии установлено, что максимальная объемная активность трития составила 41 Бк/л [13]. В подавляющем большинстве исследованных образцов объемная активность трития в морской воде не превышала 10 Бк/л [14].

В Российской Федерации после аварии на АЭС «Фукусима-1» были проведены комплексные морские экспедиции в 2011–2012, 2014, 2019, 2022–2025 гг. [15–18].

На государственном уровне мониторинг содержания трития в поверхностных водных объектах и осадках проводится Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Результаты наблюдений регулярно публикуются в ежегоднике «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств», однако программа наблюдений не включает исследование уровня трития в морских водах дальневосточных регионов [19, 20].

В связи с началом сброса очищенной воды с АЭС «Фукусима-1», а также учитывая озабоченность руководства предприятий по добыче морепродуктов и беспокойство населения, в ноябре 2023 года на заседании коллегии Роспотребнадзора было принято решение о регулярном контроле содержания трития в морской воде дальневосточных регионов Российской Федерации с целью усиления радиологического надзора. По решению коллегии в проведении мониторинга участвуют 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 (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в Камчатском, Приморском, Хабаровском краях, Магаданской, Сахалинской областях и Чукотском автономном округе.

В рамках организации долговременного мониторинга одной из ключевых задач является определение фоновых уровней трития в морской воде, а также проведение сравнительного анализа его содержания в водах Тихого океана до и после аварии на АЭС «Фукусима-1». Реализация данного подхода обеспечивает научную основу для принятия своевременных мер по обеспечению радиационной безопасности населения.

За весь период контроля удельная активность трития во всех пробах морской воды из мониторинговых точек прибрежных вод акваторий внутренних морей и Тихого океана дальневосточных регионов не превышала 8,4 Бк/кг, что существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды, получаемой из морской после опреснения (7 600 Бк/л)<sup>1</sup>.

Согласно данным, представленным в работах [21, 22], в 2024 году удельная активность трития в поверхностном слое океана к востоку от Японии (от Южных Курил до субтропических широт) составляла 0,40–0,78 тритиевых единиц (ТЕ) (0,048–0,094 Бк/кг), достигая максимальных значений в основной ветви течения Куроисио – от Южных Курил до субтропических вод.

Длительный сброс радиоактивной воды вызывает беспокойство специалистов многих стран прежде всего в связи со сложностью количественной оценки рисков, обусловленных возможным переносом сбрасываемых вод с АЭС «Фукусима-1» морскими течениями в рыбопромысловые районы и зоны добычи морепродуктов.

Тритий, находящийся в составе молекул воды, может переходить в морепродуктах и в организме человека в формы органически связанного трития [2, 24–26]. При образовании таких форм тритий выводится из организма медленнее [23].

Распространение трития от точки сброса к точкам наблюдения подчиняется сложной динамике океанических течений. Для описания переноса трития применяются различные подходы и модели, учитывающие пространственно-временную структуру океанической циркуляции и течений. В северо-западной части Тихого океана мощные океанические течения, такие как Ойясио, Куроисио, Продолжение Куроисио и Северо-Тихоокеанское течение, играют ключевую роль в транспорте радиоактивных веществ от АЭС «Фукусима-1» к дальневосточным регионам Российской Федерации по протяженным маршрутам с заметной временной задержкой [27–41]. В то же время ряд исследований, основанных на численном моделировании циркуляции тихоокеанских течений, показал существование вероятности относительно быстрого переноса трития в территориальные воды России [32, 33].

Хотя крупные и устойчивые океанические течения, хорошо отслеживаемые по спутниковым данным, дают общее представление о циркуляции вод, они не позволяют адекватно описать динамические пути перемещения и процессы смешивания водных масс. В последние годы всё более широкое применение получает лагранжевый подход, который обеспечивает высокоточное отслеживание траекторий частиц воды, оценку временных масштабов переноса радиоактивных веществ и количественную характеристику загрязнения акватории Южно-Курильской рыболовной зоны, расположенной вблизи района сброса сточных вод с АЭС «Фукусима-1».

**Цель исследования** – совершенствование методов обеспечения радиационной безопасности населения в условиях долговременного сброса радиоактивной воды с АЭС «Фукусима-1» на основе численного моделирования циркуляции морских течений.

### Задачи исследования

1. Проведение отбора проб в мониторинговых точках на расстояниях от 1 до 1500 м от береговой линии на поверхностном слое и на глубине 5 м.
2. Определение уровней удельной активности трития в пробах морской воды дальневосточных регионов (Камчатский край, Магаданская область, Приморский край, Сахалинская область, Хабаровский край, Чукотский автономный округ) за период исследования.
3. Разработка и применение численных моделей миграции трития с использованием лагранжевых траекторий (по данным AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of

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

Satellite Oceanographic) и GLOFRYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis)) для количественной оценки переноса радиоактивного вещества течениями и мезомасштабными вихрями с целью обоснования оптимальной схемы размещения мониторинговых точек.

**Материалы и методы**

С целью оценки фоновых уровней трития в морской воде дальневосточных регионов в 2023 году сотрудниками ФБУН

НИИРГ им. П.В. Рамзаева была разработана схема точек отбора проб (рис. 1А), по которой пробы морской воды собирались в 2023–2024 гг. на прибрежных участках в диапазоне 0–1000 м от береговой линии.

Методика отбора проб, их подготовка и измерение активности трития с использованием радиометра «Quantulus 1220» в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева подробно описана в статье [19]. Минимальная детектируемая активность (МДА) при проведении измерений составляла 1 Бк/кг.

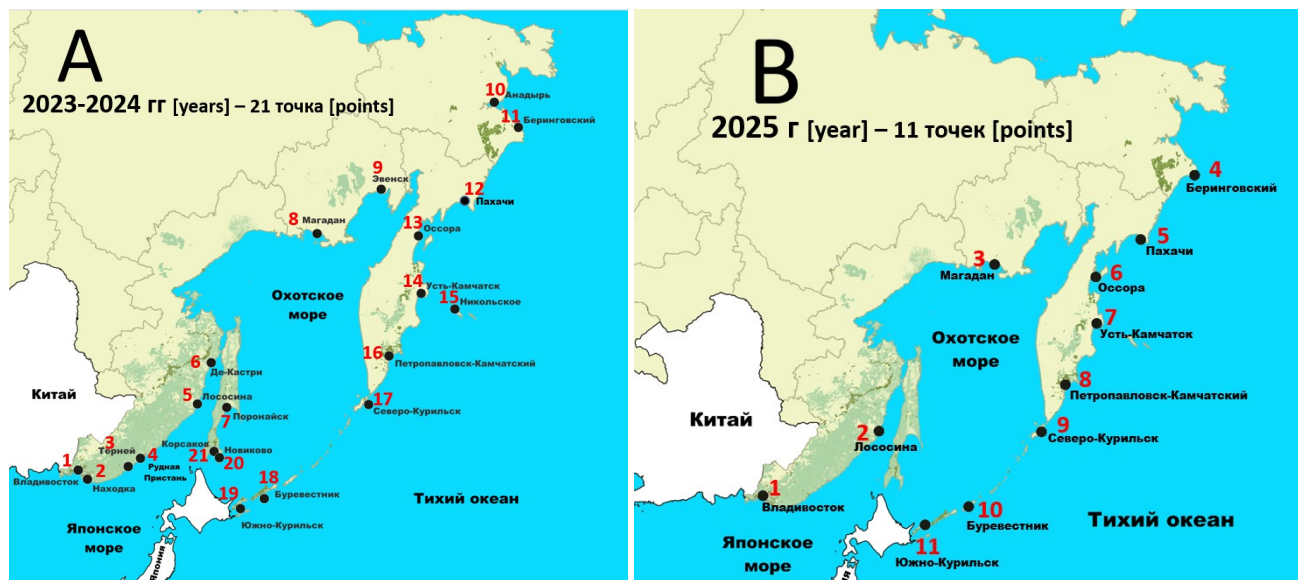


Рис. 1. Карта-схема точек отбора морской воды в дальневосточных регионах в 2023–2024 гг. (А) и 2025 г. (В)  
 [Fig. 1. Seawater sampling points in the Russian Far East regions, 2023–2024 (A) and 2025 (B)]

В 2025 году для продолжения мониторинга содержания трития в морской воде с учетом данных, полученных в 2023–2024 гг., была предложена новая схема отбора проб, представленная на рисунке 1В. В новой схеме ряд пунктов (2, 3, 4, 6, 9, 10, 15, 20, 21) были исключены. При разработке новой схемы отбора проб мы исходили из того, что наибольший интерес представляет содержание трития в образцах морской воды вдоль побережья Камчатки и Курильской гряды.

В то же время пробы, взятые в Охотском и Японском морях, рассматриваются как контрольные, поскольку поступление трития из АЭС «Фукусима-1» в эти районы маловероятно.

Всего за период исследования было отобрано и поступило на измерение в испытательный лабораторный центр ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева 557 проб морской воды, из них в 2025 году – 153 пробы. Сведения о поступивших пробах представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количество проб морской воды, поступивших из Дальневосточного федерального округа с 2023 по 2025 год  
 [Table 1. The number of seawater samples received from the Far Eastern Federal District, 2023–2025]

Субъекты Российской Федерации [Subjects of the Russian Federation]	Год [Year]					
	2023	2024	2025			
	III–IV кв. [Q3–Q4]	I–IV кв. [Q1–Q4]	I кв. [Q1]	II кв. [Q2]	III кв. [Q3]	IV кв. [Q4]
Камчатский край [Kamchatka Krai]	26	94	10	10	10	20
Магаданская область [Magadan Oblast]	2	8	5	1	1	1
Приморский край [Primorsky Krai]	27	120	26	2	2	4
Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	0	60	12	4	2	4
Хабаровский край [Khabarovsk Krai]	0	27	3	3	3	6
Чукотский автономный округ [Chukotka Autonomous Okrug]	6	36	12	3	6	3
Всего [Total]:	61	345	68	23	24	38

Для организации долговременного мониторинга поступления трития к российскому побережью необходимо было оценить соответствие существующих точек отбора проб зонам наибольшей вероятности поступления радионуклида с морскими течениями. Данное исследование выполнено на основе прогнозного моделирования переноса трития в океанских водах с использованием двух типов моделей: гидродинамических и лагранжевых. Гидродинамические модели обеспечивают описание движения водных масс с учетом таких факторов, как гравитационные силы, трение, вращение Земли и прочие физические воздействия, что позволяет моделировать циркуляцию океанских течений в масштабах океанов и прибрежных зон [27, 34, 36–41]. Лагранжевы модели реализуют численное прогнозирование траекторий отдельных частиц (трассеров), перемещающихся вместе с водной массой с учётом их исходных положений, поля скоростей, граничных условий и взаимодействия с динамикой окружающей среды. В рассматриваемом случае под трассерами подразумевается тритий, что позволяет реконструировать пути переноса радионуклида в океанских течениях и количественно оценивать его распределение в различных районах [40–41].

Лагранжевы траектории рассчитываются путем решения уравнений адвекции (1), (2):

$$\frac{d\lambda}{dt} = u(\lambda, \varphi, t) \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = v(\lambda, \varphi, t) \quad (2)$$

где  $u$  и  $v$  – угловые зональные и меридиональные компоненты скорости поля AVISO,  $\lambda$  и  $\varphi$  – долгота и широта. Угловые скорости используются для упрощения уравнений движения на сфере.

Расчеты лагранжевых траекторий выполнены посредством интегрирования уравнений (1) и (2) методом Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным временным шагом 0,001 сут. Каждая траектория рассчитывалась на 60 суток в обратном времени.

Для анализа использовались два поля скоростей. В качестве первого поля применяются геострофические скорости (скорости океанических течений), рассчитанные на основе спутниковой альтиметрии AVISO с пространственным разрешением  $1/8^\circ$  по широте и долготе. В качестве второго поля скоростей использованы данные глобального повторного анализа (реанализа) исторических наблюдений GLORYS12V1 с пространственным разрешением  $1/12^\circ$  на 50-ти уровнях, которые охватывают период альтиметрических наблюдений (спутниковых измерений высоты поверхности океана), начиная с 1993 года по настоящее время.

Оба набора данных доступны на портале CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)<sup>2</sup>.

Для анализа переноса радиоактивных частиц в океанских течениях применяется метод отслеживания пассивных маркеров, основанный на численном расчёте траекторий большого числа частиц, моделирующих пространственное распределение загрязнения в водной среде.

## Результаты и обсуждение

### Результаты наблюдений за уровнями трития

Результаты измерений удельной активности трития в пробах морской воды, отобранных в субъектах Дальневосточного федерального округа в период 2023–2025 гг., представлены в таблице 2.

В целом, средние значения удельной активности трития ( $^3\text{H}$ ) в морской воде дальневосточных регионов России колеблются от значений, близких к МДА, до значений порядка 5–6 Бк/кг (табл. 2), что свидетельствует о низком уровне радиоактивного загрязнения в исследуемых районах.

Из представленных в таблице 2 данных следует, что содержание трития в измеренных пробах морской воды субъектов Дальневосточного федерального округа Российской Федерации в первом квартале 2025 года не превышало  $4,6 \pm 1,2$  Бк/кг; во втором квартале содержание трития в морской воде варьировало в диапазоне от значений ниже МДА до  $6,1 \pm 1,2$  Бк/кг. В третьем квартале содержание трития в измеренных пробах морской воды не превышало  $2,4 \pm 1,0$  Бк/кг. В четвертом квартале содержание трития варьировало в диапазоне от значений ниже МДА до  $5,6 \pm 1,1$  Бк/кг. Наиболее высокие уровни удельной активности трития в 2025 году наблюдались в Сахалинской области, достигнув значений  $6,1 \pm 1,2$  Бк/кг. Наименьшие уровни трития наблюдались в морской воде Камчатского и Приморского краёв и Чукотского автономного округа. В этих субъектах минимальные значения удельной активности трития зачастую находятся на фоновом уровне или ниже МДА, а средние значения по периодам в основном не превышают  $1,0 \pm 0,6 - 1,7 \pm 0,8$  Бк/кг.

На основании проведённого анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Во всех пунктах наблюдения выявлены вариации удельной активности трития в морской воде.
2. Уровни трития в прибрежных водах превышают фоновые значения, характерные для центральной части Тихого океана, что свидетельствует о существовании дополнительных источников поступления, наиболее вероятным из которых является вынос трития с материковыми речными и прибрежными водами.
3. Полученные значения удельной активности трития не представляют опасности для купания и потребления опресненной морской воды, уровень вмешательства которой по тритию, в соответствии с НРБ-99/2009, составляет 7 600 Бк/кг.
4. Для организации эффективного долговременного мониторинга удельной активности трития, поступающего с морскими течениями от АЭС «Фукусима-1» в акватории дальневосточных регионов России, необходимо уточнение зон наибольшей вероятности его поступления с учётом особенностей циркуляции океанических течений.

### Результаты моделирования переноса трития после аварии на АЭС «Фукусима-1»

Анализ закономерностей переноса радиоактивного загрязнения океанических вод морскими течениями после аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 году послужил основой для выбора и настройки моделей, используемых для прогнозирования распространения трития после начала сброса радиоактивной воды в 2023 году,

<sup>2</sup>Copernicus Marine Environment Monitoring Service. URL: <http://marine.copernicus.eu>

Таблица 2. Средние уровни удельной активности трития в пробах морской воды, поступивших из субъектов Дальневосточного федерального округа Российской Федерации, Бк/кг  
 [Table 2. Mean activity concentration of tritium in seawater samples received from the federal subjects of the Russian Far East Federal District, Bq/kg]

Субъекты Российской Федерации [Subjects of the Russian Federation]	Среднее значение удельной активности <sup>3</sup> H (мин – макс), Бк/кг [Average activity concentration of <sup>3</sup> H (min – max), Bq/kg]												
	2023				2024				2025				
	III – IV [Q3 – Q4]	I [Q1]	II [Q2]	III [Q3]	IV [Q4]	I [Q1]	II [Q2]	III [Q3]	IV [Q4]	I [Q1]	II [Q2]	III [Q3]	IV [Q4]
Камчатский край [Kamchatka Krai]	< MDA*	1,1 ± 0,3 (< MDA – 2,0)	3,8 ± 0,4 (3,2 – 4,6)	3,5 ± 1,0 (1,0 – 4,8)	**	1,7 ± 0,8 (< MDA – 2,9)	1,4 ± 0,7 (< MDA – 4,3)	1,0 ± 0,6 (< MDA – 2,0)	2,3 ± 0,8 (< MDA – 5,6)				
Магаданская область [Magadan Oblast]	1,2 ± 0,4 (< MDA – 1,4)	**	3,5 ± 0,6 (2,9 – 3,9)	3,3 ± 0,9 (2,8 – 4,2)	4,3 ± 1,5 (2,7 – 5,7)	4,6 ± 1,2	< MDA	< MDA	2,6 ± 0,8				
Приморский край [Primorsky Krai]	0,8 ± 0,6 (< MDA – 3,6)	3,3 ± 0,8 (1,3 – 6,0)	3,7 ± 0,9 (3,0 – 4,4)	2,4 ± 0,7 (< MDA – 4,6)	3,5 ± 0,9 (2,8 – 4,1)	< MDA	1,1 ± 0,7 (< MDA – 1,6)	1,2 ± 0,8 (< MDA – 1,8)	3,4 ± 1,0 (2,1 – 4,6)				
Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	**	< MDA	3,1 ± 0,8 (1,1 – 4,1)	4,0 ± 0,9 (2,1 – 5,3)	3,7 ± 1,0 (3,0 – 4,4)	1,5 ± 0,8 (< MDA – 3,4)	2,4 ± 0,8 (< MDA – 6,1)	1,2 ± 0,7 (< MDA – 1,6)	3,4 ± 0,9 (2,9 – 4,0)				
Хабаровский край [Khabarovsk Krai]	**	< MDA	3,5 ± 1,0 (3,0 – 4,2)	3,1 ± 0,8 (1,0 – 4,4)	**	2,3 ± 1,0 (2,0 – 2,8)	0,9 ± 0,7 (< MDA – 2,7)	1,3 ± 0,7 (< MDA – 1,8)	3,0 ± 0,9 (2,6 – 3,4)				
Чукотский автономный округ [Chukotka Autonomous Okrug]	**	< MDA	4,8 ± 1,3 (2,3 – 8,4)	5,5 ± 1,3 (4,8 – 6,8)	3,7 ± 1,0 (3,0 – 4,3)	1,2 ± 0,9 (< MDA – 1,4)	1,3 ± 0,7 (< MDA – 2,6)	< MDA	< MDA				

\* MDA – минимально детектируемая активность – 1 Бк/кг [MDA – minimum detectable activity – 1 Bq/kg].

\*\* Пробы морской воды не поступали [The seawater samples were not received].

а также для планирования морских экспедиций в районах южных Курильских островов и в ядре течения Пролонгация Курошио [31, 38]. В ходе морских экспедиционных исследований 2012 года было установлено, что зоны концентрации лагранжевых маркеров, имитирующих загрязнение, совпадают с областями повышенной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$  [31]. Это позволило идентифицировать мезомасштабные вихревые структуры в океане, которые, как показали последующие анализы, играют ключевую роль в переносе фактического радиоактивного загрязнения.

Таким образом, лагранжевый анализ продемонстрировал высокую эффективность в качестве инструмента для выявления и прогнозирования зон потенциального накопления радиоактивных веществ в океане. Вместе с тем следует иметь в виду, что при использовании альтиметрических полей данный подход не учитывает процессы субдукции, то есть переноса поверхностной воды в глубинные слои. В результате часть загрязнения, зафиксированного по данным радиометрических измерений, концентрируется не на поверхности, а на подповерхностных горизонтах.

С 2023 года лагранжевый подход успешно применяется для моделирования путей переноса потенциального загрязнения, связанного с плановым сбросом технически очищенной воды с АЭС «Фукусима-1» [23, 24, 27, 36]. В рамках численного эксперимента, охватывающего первый этап сброса (24 августа – 11 сентября 2023 г.), в прибрежной зоне, прилегающей к АЭС, ежедневно выпускалось по 15 000 пассивных маркеров. Для каждого маркера рассчитывались траектории движения на интервале до 730 суток, до сентября 2025 г., с целью анализа долгосрочных путей переноса и распределения загрязнения [27, 33]. На основе полученных данных были сформированы композитные карты вероятных траекторий переноса, отражающие пространственное распределение потенциального загрязнения в северо-западной части Тихого океана. Карты, представленные в работе [33], были построены с использованием альтиметрических полей AVISO. Для оценки надежности результатов расчёты были повторены с применением поля скоростей реанализа GLOFRYS12V1 [36]. Сопоставление двух наборов данных показало высокое соответствие как пространственных структур, так и направлений переноса загрязнения, что подтверждает устойчивость выявленных закономерностей и достоверность применяемого метода.

Особый интерес представляют лагранжевы траектории, демонстрирующие возможность относительно быстрого (в пределах 14 суток) переноса загрязнённых вод в Южно-Курильскую промысловую зону [33]. Дальнейшее развитие данного подхода было предусмотрено в рамках серии морских экспедиций и реализовано в рейсе 2024 года, в ходе которого выявленные лагранжевым методом вихревые структуры были дополнительно охарактеризованы с использованием гидрологических и радиометрических измерений [22, 23]. Результаты этих наблюдений находятся на стадии обработки, однако предварительные данные подтверждают ключевую роль мезомасштабных вихрей как ключевого фактора эффективного переноса радиоактивных веществ.

В настоящем исследовании представлены два набора карт. Первый из них (рис. 2) отражает усреднённое поле скоростей, которое традиционно используется в океанологических исследованиях для оценки возможных путей переноса

водных масс, загрязняющих веществ или биологических объектов из одной области в другую. Такой подход, основанный на анализе среднего поля течений за определённый период или сезон, позволяет выявить основные направления циркуляции и крупномасштабные динамические структуры – струи, фронтальные зоны и вихри.

Опыт применения лагранжевых методов продемонстрировал, что непосредственный анализ поля скоростей течений не всегда обеспечивает корректную оценку траекторий и временных масштабов переноса веществ. Поля усреднённых скоростей предоставляют лишь статическое представление циркуляции, тогда как лагранжевый анализ, основанный на численном моделировании движения пассивных маркеров, позволяет выявить реальные транспортные пути и количественно оценить временные характеристики переноса вещества.

Карты распространения радиоактивной воды, представленные на рисунках 3 и 4, демонстрируют пространственное распределение концентраций и траекторий переноса радиоактивных веществ или их модельных аналогов в виде лагранжевых маркеров в поверхностных водах исследуемого региона.

Красный отрезок ( $35.6^\circ$  с.ш.,  $141^\circ$  в.д. –  $38.3^\circ$  с.ш.,  $141.6^\circ$  в.д.), показанный на рисунках 2–4 расположен вблизи АЭС «Фукусима-1», от него рассчитываются траектории маркеров. Плотность трассеров  $v$  представлена в логарифмическом масштабе. Звездочками показано расположение мониторинговых точек (пунктов): желтые звездочки соответствуют пунктам, которые планируются сохранить, а синие – тем, которые планируется исключить.

Для построения второго набора карт область, ограниченная  $25^\circ$ – $57^\circ$  с.ш.,  $127^\circ$ – $178^\circ$  в.д., разбивалась на сетку ячеек  $300 \times 300$ . Для каждой ячейки рассчитывалось количество ежесуточных следов маркеров, зафиксированных в ней за рассматриваемый период моделирования (24 августа 2023 г. – 10 сентября 2025 г.). Полученные карты характеризуют поля относительной концентрации, отражающие пути вероятностного переноса потенциального загрязнения. Такой подход позволяет выявить основные направления переноса и области аккумуляции радиоактивных веществ, а также оценить степень их проникновения в различные районы северо-западной части Тихого океана.

Построенные карты дают возможность сопоставить распределение потенциально загрязнённых вод с характером поверхностной циркуляции, включая влияние крупных течений (Курошио, Субарктического фронта) и мезомасштабных вихревых структур. Кроме того, данные карты служат инструментом для определения наиболее уязвимых зон, в которых вероятно накопление загрязнения, и позволяют в дальнейшем обосновать выбор участков для проведения мониторинговых наблюдений.

Такие карты наглядно демонстрирует наиболее вероятные очаги потенциального загрязнения и позволяют проанализировать закономерности его распределения относительно гидрологических условий. В контексте исследования они используются для сопоставления структуры загрязнения с особенностями океанической циркуляции. В отличие от усреднённых полей скоростей, лагранжевы карты фиксируют следы переноса и зоны потенциального воздействия загрязнённых вод.

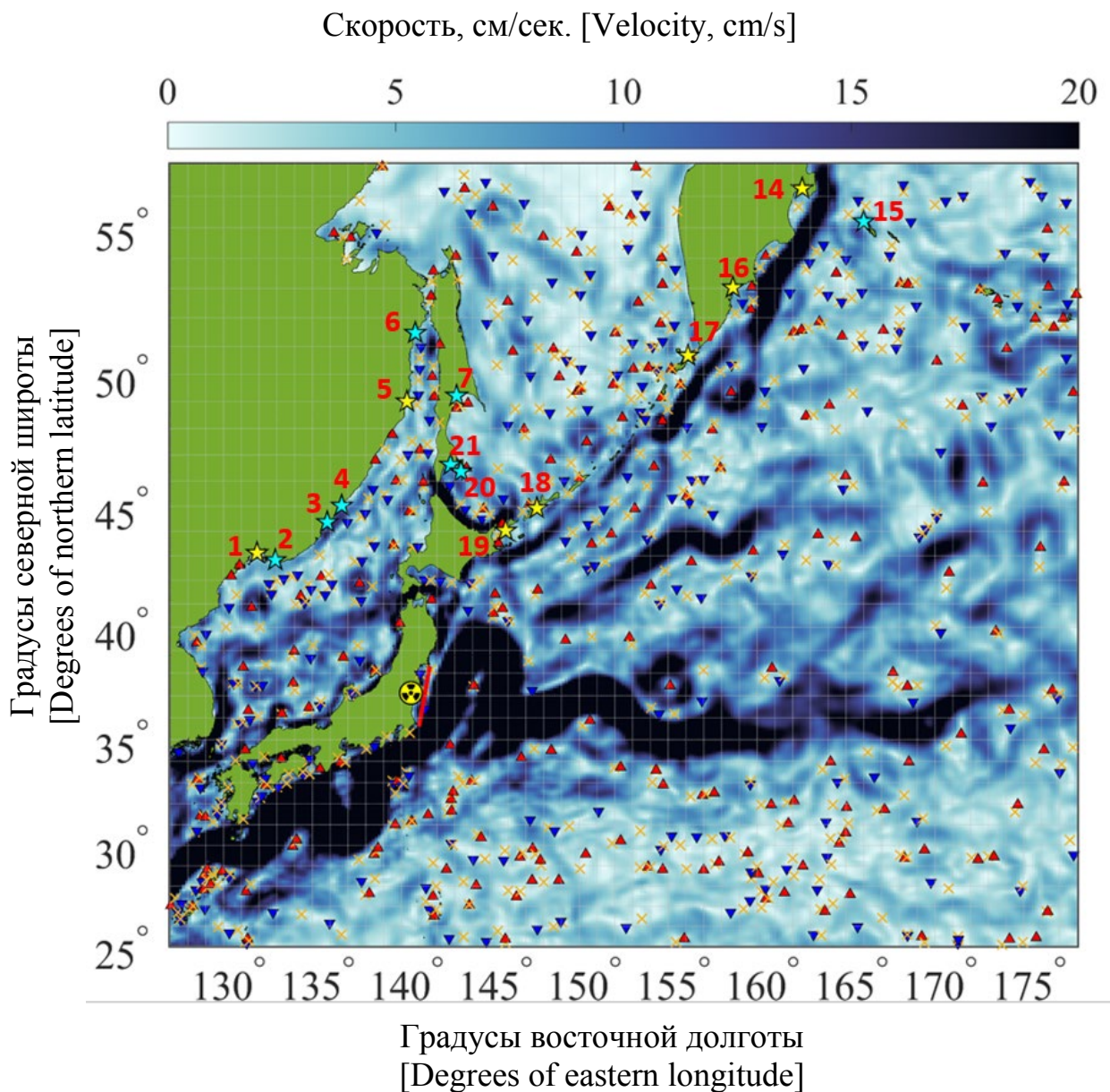


Рис. 2. Геоострофические течения, рассчитанные по альтиметрическим данным AVISO и усредненные с 1 января 2023 по 2 октября 2025 года

[Fig. 2. Geostrophic currents calculated from AVISO-altimeter data and averaged from January 1, 2023 to October 2, 2025]

Примечание: Цветовая шкала соответствует модулю скорости. Красный отрезок (35.6° с.ш., 141° в.д. – 38.3° с.ш., 141.6° в.д.) расположен вблизи АЭС «Фукусима-1», от него рассчитываются траектории маркеров. Красные треугольники ▲ соответствуют центрам антициклонов, синие ▼ – циклонов. Желтыми крестиками ✕ показаны гиперболические точки. Звездочками показано расположение мониторинговых пунктов: желтые звездочки соответствуют пунктам, которые планируются сохранить, а синие – тем, которые планируется исключить [Note: The color scale corresponds to the modulus of the velocity. The red segment (35.6° N, 141° E – 38.3° N, 141.6° E) is located near the Fukushima-1 NPP, and the marker trajectories are calculated from it. The red triangles ▲ correspond to the centers of anticyclones, and the blue ▼ correspond to cyclones. The yellow crosses ✕ represent hyperbolic points. The stars indicate the location of the monitoring points: yellow stars indicate points to be retained, while blue stars indicate points to be excluded].

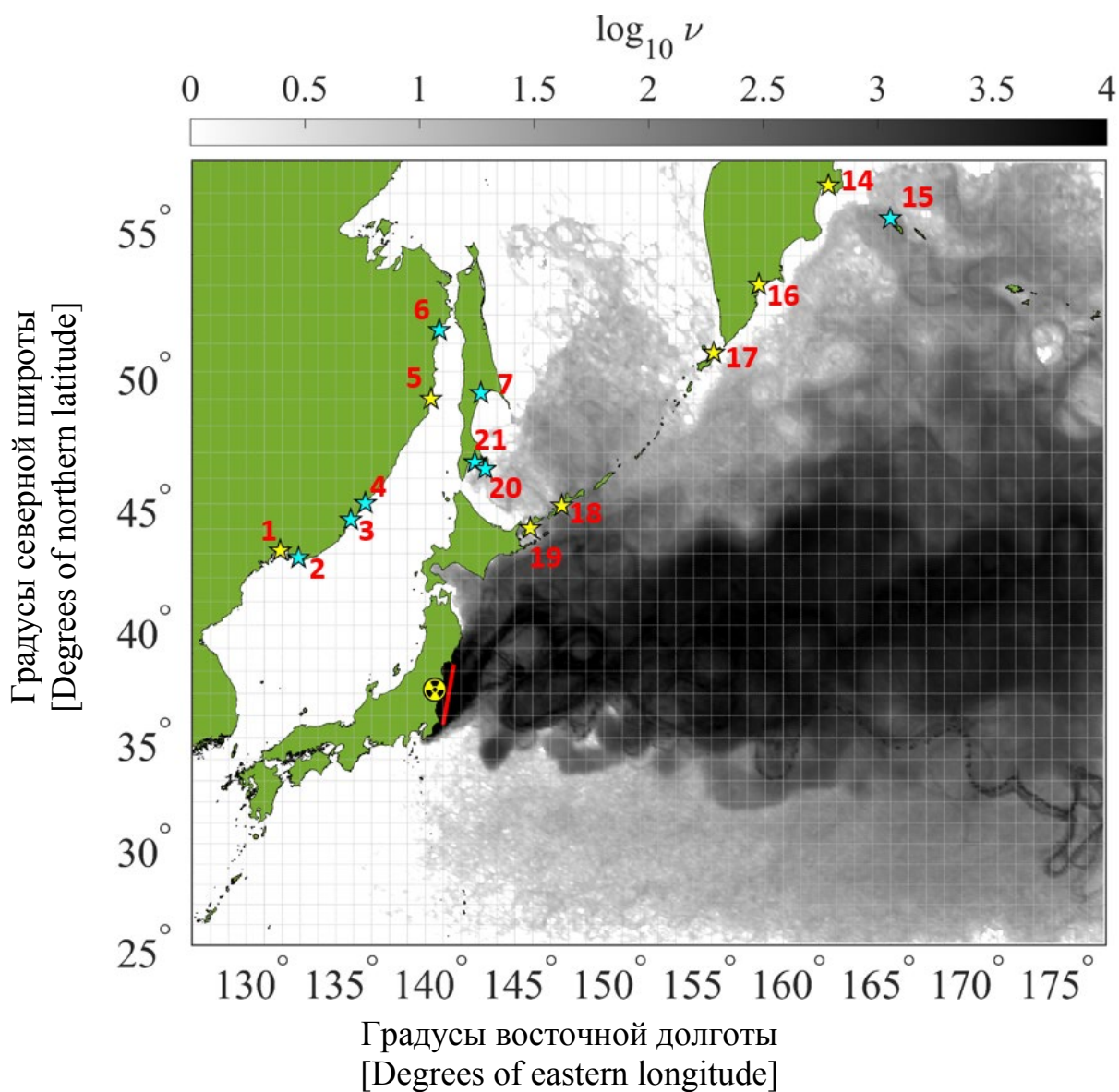


Рис. 3. Лагранжевы карты ежесуточных следов маркеров, запущенных от АЭС «Фукусима-1» по данным AVISO  
 [Fig. 3. Lagrangian maps of daily trajectories of markers released from the Fukushima-1 NPP based on AVISO data]

Примечание: Звездочками показано расположение мониторинговых точек (пунктов): желтые звездочки соответствуют пунктам, которые планируются сохранить, а синие – тем, которые планируются исключить [Note: The stars indicate the location of the monitoring points: yellow stars indicate points to be retained, while blue stars indicate points to be excluded].

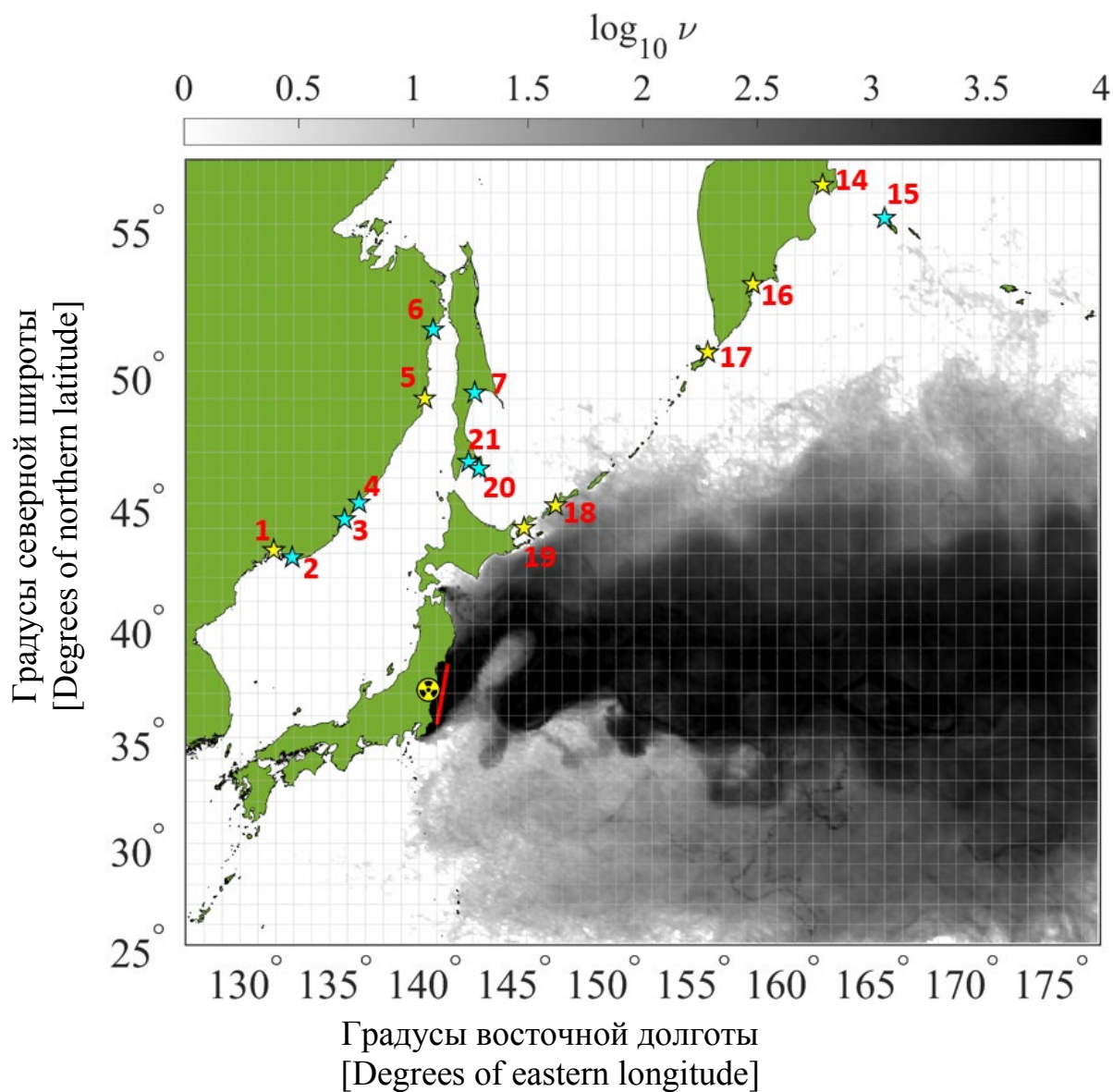


Рис. 4. Лагранжевы карты ежесуточных следов маркеров, запущенных от АЭС «Фукусима-1» по данным GLOFRYS12V1 (NEMO)

[Fig. 4. Lagrangian maps of daily trajectories of markers released from the Fukushima-1 NPP based on data from GLOFRYS12V1 (Nucleus for European Modelling of the Ocean, NEMO)]

Примечание: Звездочками показано расположение мониторинговых точек (пунктов): желтые звездочки соответствуют пунктам, которые планируются сохранить, а синие – тем, которые планируются исключить [Note: The stars indicate the location of the monitoring points: yellow stars indicate points to be retained, while blue stars indicate points to be excluded].

На рисунках 3 и 4 видно, что наибольшая вероятность потенциального загрязнения наблюдается к югу от Курильских островов и восточнее Японских островов (Хонсю, Хоккайдо). Черная зона указывает на высокую концентрацию потенциального загрязнения, охватывая Курильский пролив и часть Японского моря. По направлению к югу и востоку области вероятного загрязнения на картах постепенно размываются (светло-серые оттенки), затрагивая Охотское море и северную часть Тихого океана.

В районе северной части Хоккайдо, западного побережья Сахалина и южного побережья Камчатки (40°–50° с.ш., 140°–155° в.д.) потенциальная возможность загрязнения уменьшается (серые оттенки). Зоны с повышенной концентрацией следов маркеров, имитирующих потенциальное загрязнение, прослеживаются вдоль побережья Сахалина и вдоль Курильской гряды. Это говорит о влиянии прибрежных течений и мезомасштабных вихрей, способствующих локальному накоплению загрязнения. Южнее Алеутских островов область загрязнения заметно расширяется на восток в открытом Тихом океане. Зона Берингова моря у западного побережья Аляски и Чукотки демонстрирует относительно низкие уровни загрязнения.

В северной части Камчатки и Курильских островов (50°–55° с.ш., 150°–170° в.д.) потенциальная возможность загрязнения заметно снижается (светло-серые оттенки), за исключением отдельных локальных участков вдоль побережья, где плотность следов маркеров выше из-за взаимодействия с континентальными и прибрежными течениями.

В районе южной части острова Сахалина наблюдаются участки умеренной плотности следов маркеров. Для острова Хоккайдо (Япония) имеют место умеренные значения, особенно на восточном побережье, ближе к Курильской гряде. Концентрация следов трития вдоль Курильской островной цепи демонстрирует выраженную пространственную изменчивость с максимальными значениями у южных островов и юго-восточного побережья Камчатки.

Сопоставление обеих групп карт позволяет понять важность вихревых структур и струй в механизмах переноса и распространения потенциального загрязнения, а также уточнить направления и скорость транспортировки потенциально загрязнённых вод в пределах северо-западной части Тихого океана, что крайне важно для выбора мониторинговых точек.

Таким образом, разработанный подход обеспечивает надежную основу для постоянного и системного мониторинга, а также целенаправленного отбора проб в ключевых районах, что значительно повышает эффективность и точность наблюдений.

Проведенный анализ пространственного распределения характеристик потенциального загрязнения в регионе позволил выявить ряд характерных направлений переноса. Полученные данные убедительно свидетельствуют об отсутствии возможности переноса потенциально загрязнённых водных масс в регион Татарского пролива. При этом существует вероятность заноса загрязнения в акваторию Охотского моря и к Южным Курилам, что подчеркивает необходимость продолжения системного мониторинга.

На рисунке 3 зафиксирован существенный перенос в северном направлении. В то же время, как по данным спутниковой альтиметрии AVISO, так и по данным GLORYS12V1, перенос лагранжевых маркеров, имитирующих потенциальное загрязнение, в прибрежные районы

полуострова Камчатка не выявлен. В частности, установлено, что маркеры не достигают акваторий Авачинской и Кроноцкой бухт, а также Камчатского залива. Для объяснения выявленных особенностей адвекции в этом северном регионе было построено усреднённое поле поверхностных скоростей по данным AVISO за период с 1 января 2023 г. по 1 октября 2025 г. (рис. 2). Анализ полученных полей показал наличие выраженного вихрегенеза вдоль восточного побережья Камчатки и интенсивного Восточно-Камчатского течения, которое формирует динамический барьер, препятствующий возможности проникновения потенциально загрязнённых вод к берегу. Таким образом, гидродинамические условия региона способствуют эффективной изоляции прибрежной зоны от внешнего переноса потенциального загрязнения.

#### *Уточнение мест расположения мониторинговых точек с учетом результатов моделирования*

Расположение мониторинговых точек (пунктов), в которых производился отбор проб морской воды в 2023, 2024 и 2025 гг. представлено на рисунке 1. С целью уточнения мест расположения точек отбора проб морской воды для продолжения мониторинга они были нанесены на карты моделирования распространения радиоактивной воды, представленные на рисунках 2–4. Желтым цветом на этих рисунках выделены мониторинговые точки, в которых проводился отбор проб в 2025 году, а синим – те, которые в 2023–2024 гг. участвовали в отборе проб, но были затем исключены. Моделирование показало, что за двухлетний период существует вероятность заноса потенциально загрязнённых вод в район южной части Сахалина и к острову Беринга (точка 15), что является основанием для продолжения наблюдений и для подтверждения или уточнения прогностических оценок.

В Охотском море форма и размеры области потенциального загрязнения хорошо согласуются с системой крупномасштабной циркуляции. Перенос вдоль струи Срединного течения направлен к северо-западу, что соответствует типичной динамике водных масс в этом регионе и подтверждает достоверность проведённого моделирования.

На основании полученных результатов представляется целесообразным пересмотреть решение об исключении отдельных мониторинговых точек из программы мониторинга, особенно в районах, где моделирование указывает на возможные траектории переноса загрязнения. Рекомендуемый набор мониторинговых точек для продолжения наблюдений должен включать пункты отбора проб с номерами 15, 17, 18, 19, 20, 21 и 7, в которых, судя по результатам моделирования, поступление трития является наиболее вероятным. В качестве контрольных точек можно выбрать точки 1–4, а также 10 и 11, в которых поступление трития является маловероятным или исключено. Продолжение наблюдений в этих точках позволит повысить достоверность оценки экологических рисков и уточнить механизмы распространения загрязняющих веществ.

#### **Заключение**

Проект по сбросу очищенной воды с АЭС «Фукусима-1», содержащей тритий из-за технологической невозможности его полной фильтрации, рассчитан на реализацию в течение 30 лет. Распространение сбрасываемых вод и их поступление в прибрежные акватории дальневосточных регионов России определяется динамикой морских течений.

С 2023 года Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека осуществляет мониторинг содержания трития в пробах морской воды, обеспечивая информационную основу для поддержания радиационной безопасности населения и принятия своевременных защитных мер.

Программа контроля включает измерение фоновых концентраций трития в прибрежных водах Камчатского, Приморского и Хабаровского краёв, Магаданской и Сахалинской областей, а также Чукотского автономного округа. В Сахалинской области в 2023–2024 гг. было 6 пунктов отбора проб морской воды (7, 17, 18, 19, 20, 21), из которых 3 (7, 20, 21) были на острове Сахалин и три (17, 18, 19) – на островах Курильской гряды (рис. 1А). В 2025 году наблюдения за концентрацией трития проводились только в пунктах, представленных на рисунке 1В. В ходе исследований 2023–2025 гг. установлено, что в акватории на удалении до 1000 м от берега средняя удельная активность трития находилась в интервале от фоновых значений (менее 1 Бк/л) до 5 Бк/л и превышала уровни трития в пробах, отобранных на больших расстояниях от берега. Наиболее вероятным механизмом поступления трития в прибрежные воды является его вынос с материковыми речными и грунтовыми водами. Удельная активность трития ниже допустимых значений вмешательства по НРБ-99/2009 для рекреации и питьевого водопотребления.

Анализ наблюдений за уровнями трития в период 2023–2025 гг. показал, что для организации эффективного долгосрочного мониторинга трития в морской воде, а впоследствии и в морепродуктах, необходимо уточнение районов наиболее вероятного накопления трития в акваториях Дальнего Востока России. В настоящей работе такое уточнение выполнено на основе исследования закономерностей переноса радиоактивного загрязнения океанических вод морскими течениями. Предложен метод прогнозирования распространения радиоактивного загрязнения, основанный на лагранжевой модели, ключевой особенностью которой является использование полей скоростей, полученных из спутниковой альтиметрии и численного моделирования океанической циркуляции. Применяемый подход позволяет не только строить карты пространственного распределения загрязнения, но и выявлять основные транспортные коридоры, оценивать вклад отдельных циркуляционных структур (мезомасштабных вихрей, меандров и фронтов) в перенос загрязнённых вод, а также определять вероятность их поступления в рыболовные районы и прибрежные зоны Российской Федерации.

Результаты численного моделирования показали, что наибольшая вероятность поступления трития с АЭС «Фукусима-1» наблюдается в районах Южных Курильских островов, острова Сахалин, южной оконечности Камчатки и острова Беринга. Сопоставление координат существующих пунктов мониторинга с картами, полученными методом лагранжева моделирования, позволило оптимизировать сеть наблюдений, выделив приоритетные участки для контроля за миграцией трития.

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

Попова А.Ю. – организация сбора проб морской воды из дальневосточных регионов, разработка концепции, определение цели и формулирование задач исследования.

Романович И.К. – общее научное руководство, редактирование текста статьи, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Репин В.С. – разработка концепции исследования, организация отбора проб морской воды из дальневосточных регионов, анализ, обобщение и интерпретация результатов исследования, написание текста статьи.

Варфоломеева К.В. – организация сбора проб морской воды из дальневосточных регионов, координация работы участников проекта, сбор и анализ литературных источников, написание текста статьи.

Зеленцова С.А. – организация сбора проб воды из дальневосточных регионов, анализ литературных источников, написание текста статьи.

Седнев К.А. – подготовка проб и проведение измерений на содержание трития, сбор, систематизация и оформление результатов измерений, поиск литературных источников, подготовка картографических материалов.

Библин А.М. – поиск и анализ литературных источников, подготовка картографических материалов, внесении редакционных правок.

Будянский М.В. – общее руководство проектом, обобщение, систематизация и обработка материалов исследования, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов исследования, написание текста статьи.

Лебедева М.А. – обработка и систематизация первичных материалов исследования, поиск литературных источников, подготовка картографических материалов, содержательное редактирование текста статьи.

Улейский М.Ю. – разработка алгоритма и численное моделирование адвекции маркеров, имитирующих потенциальное загрязнение от АЭС «Фукусима».

Белоненко Т.В. – общее и научное руководство проектом, разработка концепции изложения материалов исследования.

#### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность специалистам ФБУЗ Центр гигиены и эпидемиологии в Приморском, Камчатском и Хабаровском крае, а также в Сахалинской и Магаданской областях и Чукотском автономном округе за их участие в своевременном отборе и отправке проб морской воды в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Авторы благодарны рецензентам за рецензирование рукописи и конструктивные замечания, позволившие улучшить ее качество.

#### **Информация о конфликте интересов**

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

#### **Сведения об источнике финансирования**

Исследования выполнены в рамках выполнения НИР «Исследование уровней трития в морской воде дальневосточных регионов Российской Федерации». Численное моделирование в поле AVISO реализовано при поддержке гранта СПбГУ (№ 129659573). Численное моделирование в поле GLORYS12V1 реализовано при поддержке гранта РФФИ (№ 25-17-00021). Лагранжев анализ проведен на высокопроизводительном кластере Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН (Госзадание № 124022100072–5).

Литература

1. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М., 2018. 408 с.
2. Боровой А.А., Гаврилов С.Л., Хвошинский В.А. Фукусима. Проблема воды. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2024. 44 с.
3. Yamanishi T., Kakiuchi H., Tauchi H. et al. Discussions on Tritiated Water Treatment for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station // *Fusion Science and Technology*. 2020. Vol. 76, No. 4. P. 430–438. DOI: 10.1080/15361055.2020.1716454.
4. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Completion of the Discharge from Measurement. Confirmation Facility Tank Group B (First Discharge). URL: <https://clck.ru/3RY2K8> (Дата обращения: 13.10.2025).
5. Buesseler K.O. Opening the floodgates at Fukushima // *Science*. 2020. Vol. 369, No 6504. P. 621–622. DOI: 10.1126/science.abc1507.
6. IAEA Comprehensive Report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. IAEA, 2023. 129 p. URL: [https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea\\_comprehensive\\_alps\\_report.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_comprehensive_alps_report.pdf) (Дата обращения: 13.10.2025).
7. Сообщение постоянного представительства Японии при Агентстве от 20 июля 2022 года: Информационный циркуляр. INFCIRC/1007 от 4 августа 2022 года. Международное агентство по атомной энергии. 20 июля 2022. URL: [https://www.iaea.org/sites/default/files/publications.documents/infcircs/2022/infcirc1007\\_rus.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/publications.documents/infcircs/2022/infcirc1007_rus.pdf). (Дата обращения: 20.10.2025).
8. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Сброс очищенной воды на АЭС «Фукусима – Дайити». URL: <https://www.iaea.org/ru/temy/reagirovanie/sbroschishchennoyvodynaesfukusimadayiti/pressrelyz>. 2025 (Дата обращения: 01.10.2025).
9. Tritium in the environment. International Atomic Energy Agency. Description: Vienna: International Atomic Energy Agency. 2025. Technical: reports series (International Atomic Energy Agency), ISSN 0074–1914; no. 495. URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15287-DOC\\_010\\_495\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15287-DOC_010_495_web.pdf) (Дата обращения: 19.10.2025).
10. Radiation Monitoring in Seawater // Hong Kong Observatory. URL: <https://www.hko.gov.hk/en/radiation/monitoring/seawater.html> (Дата обращения: 10.10.2025).
11. Marine Environment Radiation Monitoring Data // Nuclear Safety Information Center (NSIC). URL: <https://nsic.nssc.go.kr/marine/marineMonitoring.do> (Дата обращения: 10.10.2025).
12. Monitoring Values. Taiwan Radiation Monitoring Center. URL: <https://tworis.nusc.gov.tw/monitorvalue.php> (Дата обращения: 10.10.2025).
13. Environmental Radiation Monitoring. Nuclear Regulation Authority, Japan. URL: <https://www.monitororbs.jp/en/> (Дата обращения: 10.10.2025).
14. Environmental Radiation Monitoring. Nuclear Regulation Authority (NRA), Japan. URL: <https://www.monitororbs.jp/en/> (Дата обращения: 20.10.2025).
15. Никитин А.И., Рамзаев В.П., Осокин В.М. и др. Экспедиционные радиэкологические исследования в Японском море и северо-западной части Тихого океана после аварии на японской АЭС «Фукусима-1»: предварительные результаты // *Радиационная гигиена*. 2011. Т. 4, № 3. С. 14–35.
16. Романович И.К., Громов А.В., Гончарова Ю.Н. и др. Предварительный анализ данных первичного обследования радиационной обстановки в юго-восточных районах Сахалинской области после аварии на АЭС «Фукусима-1» // *Радиационная гигиена*. 2011. Т. 4, № 3. С. 36–42.
17. Библин А.М., Иванов С.А., Рамзаев П.В. и др. О некоторых результатах третьей комплексной многопрофильной экспедиции Русского географического общества по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском районе Тихого океана в 2014 г. // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8, № 1. С. 62–66.
18. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. О четвертой комплексной научной экспедиции по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 1. С. 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-6-15.
19. Репин В.С., Варфоломеева К.В., Библин А.М. и др. Содержание трития в прибрежных водах Дальневосточных регионов Российской Федерации в первый год контролируемого сброса воды с АЭС «Фукусима-1» (Предварительные данные) // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 4. С. 27–34. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-27-34.
20. Ежегодник «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств / ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета». 2024. URL: [https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodnik\\_ki/ro/ezhegodnik\\_ro\\_2024.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodnik_ki/ro/ezhegodnik_ro_2024.pdf). (Дата обращения: 14.10.2025).
21. Булгаков В.Г., Вакуловский С.М., Крышев И.И. и др. Мониторинг радиационной обстановки на территории России. 2018 г. 68 с. URL: [https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/publications/MonitoringRO\\_2018.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/publications/MonitoringRO_2018.pdf) (Дата обращения: 14.10.2025).
22. Лобанов В.Б., Горячев В.А., Сергеев А.Ф. и др. Нужно ли бояться «фукусимского трития»? URL: <https://www.roi.dvo.ru/sites/default/files/News/Нужно%20ли%20бояться%20-%20на%20сайт-mc.pdf> (Дата обращения: 03.10.2024).
23. Лобанов В.Б., Горячев В.А., Сергеев А.Ф. и др. Оценка радиэкологического состояния дальневосточных морей России в связи со сливом загрязненной воды на АЭС «Фукусима-1» (рейс №71 НИС «Академик Опарин») // *Океанология*. 2025. Т. 65, № 1. С. 193–196. DOI: 10.31857/S0030157425010175.
24. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. *Annals of the International Commission on Radiological Protection*. 2016. Vol. 45, Issue 3/4. 352 p.
25. Бондарева Л.Г., Чеботина М.Я., Артамонова С.Ю. и др. Тритий. Теория, практика, последствия: монография / Л.Г. Бондарева, М.Я. Чеботина, С.Ю. Артамонова, И.Г. Тананаев. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 2024. 359 с.
26. Galeriu D., Melintescu A. Retention of tritium in reference persons: a metabolic model. Derivation of parameters and application of the model to the general public and to workers // *Journal of Radiological Protection*. 2010. Vol. 30, No 3. P. 445–468. DOI: 10.1088/0952-4746/30/3/003.
27. Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Fayman P.A. et al. Can contaminated waters from the Fukushima Daiichi NPP penetrate the East China Sea? // *Pure and Applied Geophysics*. 2025. Vol. 182, P. 1843–1860. DOI: 10.1007/s00024-025-03688-0.
28. Yu Z., Shen Z., Shi Z. et al. The spatial and temporal variations in tritium in the North Pacific over the past 70 years and their impacts on the marine environment and organisms // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2025. Vol. 130. e2024JC022058. DOI: 10.1029/2024JC022058.

29. Wang D., Zhou Q., Yin Y. et al. Implications of Fukushima's Radioactive Water Discharge on Global Environmental Sustainability // *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58, No 7. P. 3061–3064. DOI: 10.1021/acs.est.4c00955.
30. Wei Y., Zhang J., Cao X. et al. Fukushima's Radioactive Water Threatens Coastal Groundwater // *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58, No 42. P. 18450–18455. DOI: 10.1021/acs.est.4c10136.
31. Budyansky M.V., Goryachev V.A., Kaplunenko D.D. et al. Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean // *Deep-Sea Research I*. 2015. Vol. 96, P. 15–27. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.09.007.
32. Chang Zhao, Gang Wang, Min Zhang et al. Transport and dispersion of tritium from the radioactive water of the Fukushima Daiichi nuclear plant // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 169. Article 112515. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112515.
33. Budyansky M.V., Udalov A.A., Lebedeva M.A., Belonenko T.V. Assessment of Pollution of the Waters in the South Kuril Fishing Zone of Russia by Radioactive Waters from the Fukushima-1 NPP Based on Lagrangian Modeling // *Doklady Earth Sciences*. 2024. Vol. 515, Part 1, P. 458–467. DOI: 10.1134/S1028334X2360305X. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1028334X2360305X> (Дата обращения: 14.10.2025).
34. Garraffo Z.D., Mariano A.J., Griffa A. et al. Lagrangian data in a high-resolution numerical simulation of the North Atlantic: I Comparison with in situ drifter data // *Journal of Marine Systems*. 2001. Vol. 29, P. 157–176.
35. Beron-Vera F.J., Olascoaga M.J., Goni G.J. Oceanic mesoscale eddies as revealed by Lagrangian coherent structures // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35. P. L12603. DOI: 10.1029/2008GL033957.
36. Budyansky M.V., Belonenko T.V., Lebedeva M.A., Udalov A.A. Surface Transport of Technical Waters from Fukushima NPP to the South Kuril Fishing Zone // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. Vol. 24. P. ES4002. DOI: 10.2205/2024es000934.
37. Prants S.V., Budyansky M.V., Ponomarev V.I., Uleysky M.Yu. Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street // *Ocean Modelling*. 2011. Vol. 38, No 1–2, P. 114–125.
38. Prants S.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V. Numerical simulation of propagation of radioactive pollution in the ocean from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant // *Doklady Earth Sciences*. 2011. Vol. 439, No 2, 1179–1182.
39. Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides // *Ocean Science*. 2017. Vol. 13, P. 453–463. DOI: 10.5194/os-13-453-2017.
40. Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian study of surface transport in the Kuroshio Extension area based on simulation of propagation of Fukushima-derived radionuclides // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2014. Vol. 21, No 1. P. 279–289. DOI: 10.5194/npg-21-279-2014.
41. Prants S.V., Ponomarev V.I., Budyansky M.V. et al. Lagrangian analysis of mixing and transport of water masses in the marine bays // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. Vol. 49, No 1. P. 82–96.

Поступила: 14.11.2025

**Попова Анна Юрьевна** – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач Российской Федерации, руководитель Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0003-2567-9032

**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

**Репин Виктор Степанович** – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. E-mail: v.repin@mail.ru  
ORCID: 0009-0005-9897-0930

**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  
ORCID: 0009-0008-3483-806X

**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

**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

**Библин Артем Михайлович** – старший научный сотрудник, руководитель Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0001-7165-4923

**Будянский Максим Васильевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных динамических систем Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия  
ORCID: 0000-0003-2291-6792

**Лебедева Мария Алексеевна** – аспирант Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия  
ORCID: 0009-0002-2044-9625

**Улейский Михаил Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных динамических систем Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия  
ORCID: 0000-0001-6499-1470

**Белоненко Татьяна Васильевна** – доктор географических наук, профессор кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0003-4608-7781

**Для цитирования:** Попова А.Ю., Романович И.К., Репин В.С., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Библин А.М., Будянский М.В., Лебедева М.А., Улейский М.Ю., Белоненко Т.В. 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

---

## Radiation safety assurance for the population of the Far Eastern regions of the Russian Federation under conditions of long-term discharge of water from the Fukushima–1 NPP

Anna Yu. Popova<sup>1</sup>, Ivan K. Romanovich<sup>2</sup>, Victor S. Repin<sup>2</sup>, Kseniya V. Varfolomeeva<sup>2</sup>, Svetlana A. Zelentsova<sup>2</sup>, Konstantin A. Sednev<sup>2</sup>, Artem M. Biblin<sup>2</sup>, Maxim V. Budyansky<sup>3,4</sup>, Maria A. Lebedeva<sup>3,4</sup>, Mikhail Yu. Uleysky<sup>3</sup>, Tatyana V. Belonenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow, Russia

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

<sup>3</sup> V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

<sup>4</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*In connection with the planned prolonged discharge of tritium-containing water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, a gradual increase in tritium concentrations is expected in the coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation. The aim of this study is to improve the methods for ensuring the radiation safety of the population under conditions of long-term discharge of radioactive water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant based on numerical modeling of ocean current circulation. Materials and Methods: Seawater samples from the coastal areas of Kamchatka, Primorsky, and Khabarovsk Krai, Magadan and Sakhalin Oblasts, and the Chukotka Autonomous Okrug for the period 2023–2025 were used for the analysis of tritium content. Lagrangian models accounting for the spatiotemporal structure of oceanic circulation and currents were employed to describe tritium transport processes. Results and Discussion: The mean values of tritium specific activity in samples collected at distances of up to 1000 m from the shore were shown to range from less than 1.0 Bq/kg to 5.5 Bq/kg. Numerical modeling revealed potential accumulation zones for tritium discharged with treated water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: the Southern Kuril Islands, Sakhalin Island, the southern tip of the Kamchatka Peninsula, and Bering Island. The East Kamchatka Current forms a dynamic barrier along the eastern coast of Kamchatka, limiting the intrusion of contaminated waters into coastal areas. Conclusion: To organize effective long-term monitoring of tritium in seawater and, subsequently, in seafood, it is necessary to refine the areas of the most likely tritium accumulation in the waters of the Russian Far East.*

**Key words:** Fukushima-1 NPP, tritium, activity concentration, seawater, marine currents modeling, Pacific Ocean, Far Eastern Federal District.

---

**Viktor S. 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: V.Repin@mail.ru

### Authors' personal contribution

Anna Yu. Popova – organization of seawater sampling in the Far Eastern regions, development of the research concept, definition of the study objectives, and formulation of research tasks.

Ivan K. Romanovich – scientific supervision, editing of the manuscript, final approval of the published version.

Victor S. Repin – development of the research concept, organization of seawater sampling in the Far Eastern regions, analysis, synthesis, and interpretation of research results, writing of the manuscript.

Kseniya V. Varfolomeeva – organization of seawater sampling in the Far Eastern regions, coordination of project participants, collection and analysis of literature sources, manuscript writing.

Svetlana A. Zelentsova – organization of water sampling in the Far Eastern regions, literature review, manuscript writing.

Konstantin A. Sednev – preparation of samples and tritium measurements, collection, systematization, and documentation of measurement results, literature search, preparation of cartographic materials.

Artem M. Biblin – literature search and analysis, preparation of cartographic materials, editorial corrections.

Maxim V. Budyansky – overall project supervision, compilation, systematization, and processing of research materials; execution of calculations, analysis and interpretation of results, and manuscript writing.

Maria A. Lebedeva – processing and systematization of primary research data, literature review, cartographic visualization, and substantive editing of the manuscript.

Mikhail Yu. Uleysky – algorithm development and numerical modeling of marker advection to simulate potential contamination from the Fukushima NPP.

Tatyana V. Belonenko – conceptualization and scientific supervision of the project, and development of the framework for research presentation.

### Acknowledgements

The authors express their gratitude to the specialists of the FBUZ Center for Hygiene and Epidemiology in Primorsky, Kamchatka, and Khabarovsk Krai, as well as in Sakhalin and Magadan Oblasts and the Chukotka Autonomous Okrug for their timely participation in sampling and sending seawater samples to Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia. The authors also thank the reviewers for their review of the manuscript and constructive comments that helped improve its quality.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest in conducting the work and preparing this article.

### Sources of funding

The research was conducted within the framework of the scientific project titled "Investigation of Tritium Levels in the Seawater of the Far Eastern Regions of the Russian Federation". Numerical simulations implemented using the AVISO dataset were performed with support from the grant of Saint Petersburg State University (No. 129659573). Simulations based on the GLO-

RYS12V1 dataset were supported by the Russian Science Foundation grant (No. 25-17-00021). Lagrangian analysis was carried out on the high-performance computing cluster of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (State assignment No. 124022100072–5).

### References

1. Arutyunyan RV, Bolshov LA, Borovoy AA, Velikhov EP. System analysis of causes and consequences of the accident at Fukushima-1 NPP. Institute of Safe Development of Nuclear Energy RAS. 2018:408. (In Russian).
2. Borovoy AA, Gavrilov SL, Khvoshchinsky VA. Fukushima: The water problem. Kurchatov Institute; 2024. 44 p. (In Russian).
3. Yamanishi T, Kakiuchi H, Tauchi H, Yamamoto T, Yamamoto I. Discussions on tritiated water treatment for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Fusion science and technology*. 2020;76(4): 430-438. DOI: 10.1080/15361055.2020.1716454.
4. Fukushima Daiichi nuclear power station completion of the discharge from measurement. Confirmation facility tank group B (first discharge). Available from: [https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2023/reference\\_20230911\\_01-e.pdf](https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2023/reference_20230911_01-e.pdf) [Accessed 13 Oct 2025].
5. Buesseler KO. Opening the floodgates at Fukushima. *Science*. 2020;369(6504): 621-622. DOI: 10.1126/science.abc1507.
6. IAEA. Comprehensive report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Vienna: IAEA; 2023. 129 p. Available from: [https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea\\_comprehensive\\_alps\\_report.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_comprehensive_alps_report.pdf) [Accessed: October 13, 2025].
7. Communication from the Permanent Mission of Japan to the Agency dated 20 July 2022: Information Circular. INFCIRC/1007 dated 4 August 2022. International Atomic Energy Agency. 20 July 2022. Available from: [https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/2022/infirc1007\\_rus.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/2022/infirc1007_rus.pdf) [Accessed: October 20, 2025] (In Russian).
8. International Atomic Energy Agency (IAEA). Discharge of treated water at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. 2025. Available from: <https://www.iaea.org/ru/temy/reagirovanie/sbros-ochishchennoy-vody-na-aes-fukushima-dayiti/press-relizy> [Accessed: October 1, 2025] (In Russian).
9. Tritium in the environment. International Atomic Energy Agency. Description: Vienna: International Atomic Energy Agency. 2025. Technical: reports series. No 495. Available from: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15287-DOC\\_010\\_495\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15287-DOC_010_495_web.pdf). [Accessed: October 19, 2025].
10. Radiation Monitoring in Seawater. Hong Kong Observatory. Available from: <https://www.hko.gov.hk/en/radiation/monitoring/seawater.html> [Accessed: October 10, 2025].
11. Marine Environment Radiation Monitoring Data. Nuclear Safety Information Center (NSIC). Available from: <https://nsic.nssc.go.kr/marine/marineMonitoring.do> [Accessed: October 10, 2025].
12. Monitor Value. Taiwan Radiation Monitoring Center. Available from: <https://tworis.nusc.gov.tw/monitorvalue.php> [Accessed: October 10, 2025].
13. Environmental Radiation Monitoring. Nuclear Regulation Authority, Japan. Available from: <https://www.monitororbs.jp/en/> [Accessed: October 10, 2025].
14. Environmental Radiation Monitoring. Nuclear Regulation Authority (NRA), Japan. Available from: <https://www.monitororbs.jp/en/> [Accessed: October 10, 2025].
15. Nikitin AI, Ramzaev VP, Osokin VM, Sergeev AS, Sevastyanov AV, Aliev RA, et al. Radioecological investigations in the Sea of Japan

- and the north-west part of the Pacific Ocean after the accident at the NPP "Fukushima-1" in Japan: preliminary results. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2011;4(3): 14-35. (In Russian).
16. Romanovich IK, Gromov AV, Goncharova YN. Preliminary analysis of the primary survey data of the radiation situation in the south-eastern Sakhalin region after the Fukushima-1 NPP accident. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2011;4 (3): 36-42. (In Russian).
  17. Biblin AM, Ivanov SA, Ramzaev PV, Basalaeva LN. Selected results of the third comprehensive multidisciplinary expedition of the Russian Geographical Society monitoring radiation conditions in the Kuril-Kamchatka region of the Pacific Ocean in 2014. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2015;8(1): 62-66. (In Russian).
  18. Onishchenko GG, Popova AY, Romanovich IK, Ivanov SA, Biblin AM, Repin VS, et al. The fourth comprehensive scientific expedition monitoring radiation conditions in the Kuril-Kamchatka region of the Pacific Ocean. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 6-15. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-6-15. (In Russian).
  19. Repin VS, Varfolomeeva KV, Biblin AM, Sednev KA, Zelentsova SA, Arkhangelskaya GV. Tritium content in coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation in the first year of controlled water discharge from the Fukushima-1 NPP (preliminary data). *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2024;17(4): 27-34. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-27-34. (In Russian).
  20. Report "Radiation situation in Russia and neighboring countries" / FGBU NPO Taifun Rosgidromet. Available from: [https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik\\_ro\\_2024.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2024.pdf) [Accessed: October 14, 2025] (In Russian).
  21. Bulgakov VG, Vakulovsky SM, Kryshev II, Gnilomedov VD, Katkova MN, Uvarov VD, et al. Radiation monitoring in the territory of Russia. 2018; 68 p. Available from: [https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/publications/MonitoringRO\\_2018.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/publications/MonitoringRO_2018.pdf) [Accessed: October 14, 2025] (In Russian).
  22. Lobanov VB, Goryachev VA, Sergeev AF, Budyansky MV. Should We Be Afraid of "Fukushima Tritium"? Available from: <https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/News/Нужно%20ли%20бояться%20-%20на%20сайт-мс.pdf> [Accessed: October 03, 2024] (In Russian).
  23. Lobanov VB, Goryachev VA, Sergeev AF, Tikhomirov A. A. Assessment of the Radioecological state of the far eastern seas of Russia in connection with polluted water discharge from the Fukushima-1 NPP (Cruise 71 of the R/V Akademik Oparin). *Oceanology*. 2025;65(1): 173–175. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700802>. (In Russian).
  24. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. Annals of the International Commission on Radiological Protection. 2016;45(3/4): 352.
  25. Bondareva LG, Chebotina MY, Artamonova SY, Tananaev IG. Tritium: theory, practice, consequences: monograph. Apatity: Kola Science Center Publishing House; 2024. 359 p. (In Russian).
  26. Galeriu D, Melintescu A. Retention of tritium in reference persons: a metabolic model. Derivation of parameters and application of the model to the general public and to workers. *Journal of Radiological Protection*. 2010;30(3): 445-468. DOI: 10.1088/0952-4746/30/3/003.
  27. Budyansky MV, Uleysky MYu, Fayman PA, Didov AA, Lebedeva MA, Udalov AA, et al. Can contaminated waters from the Fukushima Daiichi NPP penetrate the East China Sea? *Pure and Applied Geophysics*. 2025;182: 1843–1860. DOI: 10.1007/s00024-025-03688-0.
  28. Yu Z, Shen Z, Shi Z, Fang W, Liu X, Yu W, et al. The spatial and temporal variations in tritium in the North Pacific over the past 70 years and their impacts on the marine environment and organisms. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2025;130: e2024JC022058. DOI: 10.1029/2024JC022058.
  29. Wang D, Zhou Q, Yin Y, Lu D, Hu L, Richmond RH, et al. Implications of Fukushima's Radioactive Water Discharge on Global Environmental Sustainability. *Environmental Science & Technology*. 2024;58(7): 3061–3064. DOI: 10.1021/acs.est.4c00955.
  30. Wei Y, Zhang J, Cao X, Yeh T-CJ, Chen Y, Chen C, et al. Fukushima's Radioactive Water Threatens Coastal Groundwater. *Environmental Science & Technology*. 2024;58(42): 18450–18455. DOI: 10.1021/acs.est.4c10136.
  31. Budyansky MV, Goryachev VA, Kaplunenko DD, Lobanov VB, Prants SV, Sergeev AF, et al. Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean. *Deep-Sea Research I*. 2015;96: 15–27. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.09.007.
  32. Chang Z, Wang G, Zhang M, Wang G, de With G, Bezhenar R, et al. Transport and dispersion of tritium from the radioactive water of the Fukushima Daiichi nuclear plant. *Marine Pollution Bulletin*. 2021;169: 112515. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112515.
  33. Budyansky MV, Udalov AA, Lebedeva MA, Belonenko TV. Assessment of Pollution of the Waters in the South Kuril Fishing Zone of Russia by Radioactive Waters from the Fukushima-1 NPP Based on Lagrangian Modeling. *Doklady Earth Sciences*. 2024;515(1): 458–467. DOI: 10.1134/S1028334X2360305X.
  34. Garraffo ZD, Mariano AJ, Griffa A, Veneziani C, Chassignet EP. Lagrangian data in a high-resolution numerical simulation of the North Atlantic: I Comparison with in situ drifter data. *Journal of Marine Systems*. 2001;29: 157–176.
  35. Beron-Vera FJ, Olascoaga MJ, Goni GJ. Oceanic mesoscale eddies as revealed by Lagrangian coherent structures. *Geophysical Research Letters*. 2008;35: L12603. DOI:10.1029/2008GL033957.
  36. Budyansky MV, Belonenko TV, Lebedeva MA, Udalov AA. Surface Transport of Technical Waters from Fukushima NPP to the South Kuril Fishing Zone. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024;24(4): 1-17. DOI: 10.2205/2024ES000934.
  37. Prants SV, Budyansky MV, Ponomarev VI, Uleysky MYu. Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street. *Ocean Modelling*. 2011;38(1–2): 114–125.
  38. Prants SV, Uleysky MYu, Budyansky MV. Numerical simulation of propagation of radioactive pollution in the ocean from the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Doklady Earth Sciences*. 2011;439(2): 1179–1182.
  39. Prants SV, Budyansky MV, Uleysky MYu. Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides. *Ocean Sciences*. 2017;13: 453–463. DOI: 10.5194/os-13-453-2017.
  40. Prants SV, Budyansky MV, Uleysky MYu, Fayman PA. Lagrangian study of surface transport in the Kuroshio Extension area based on simulation of propagation of

Fukushima-derived radionuclides. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2014;21(1): 279–289. DOI: 10.5194/npg-21-279-2014.

water masses in the marine bays. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013;49(1): 82–96.

41. Prants SV, Ponomarev VI, Budyansky MV, Uleysky MYu, Fayman PA. Lagrangian analysis of mixing and transport of

Received: November 14, 2025

**Anna Yu. Popova** – Doctor of Medical Sciences, Professor, Honored Doctor of the Russian Federation, Head of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0003-2567-9032

**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 named after Professor P.V. Ramzaev of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia  
ORCID: 0000-0003-0668-459X

**For correspondence: Viktor S. Repin** – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru)  
ORCID: 0009-0005-9897-0930

**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  
ORCID: 0009-0008-3483-806X

**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

**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

**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: 0000-0001-7165-4923

**Maxim V. Budyansky** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Nonlinear Dynamical Systems, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia  
ORCID: 0000-0003-2291-6792

**Maria A. Lebedeva** – Postgraduate Student at V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Russia  
ORCID: 0009-0002-2044-9625

**Mikhail Yu. Uleysky** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Nonlinear Dynamical Systems, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia  
ORCID: 0000-0001-6499-1470

**Tatyana V. Belonenko** – Doctor of Geographical Sciences, Professor at the Department of Oceanology, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia  
ORCID: 0000-0003-4608-7781

**For citation: Popova A.Yu., Romanovich I.K., Repin V.S., Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Biblin A.M., Budyansky M.V., Lebedeva M.A., Uleysky M.Yu., Belonenko T.V. Radiation safety assurance for 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. Vol. 19, No. 1. P. 7–23. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-23**

## Динамика выведения плутония с мочой и калом на примере случаев острого ингаляционного поступления промышленных соединений плутония

Соколова А.Б., Ефимов А.В., Ишунина М.В., Сыпко С.А.

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

*Контроль доз внутреннего облучения от плутония наиболее эффективно осуществляется косвенным методом, основанным на интерпретации результатов измерений активности нуклида в экскретах с использованием биокинетических и дозиметрических моделей. В настоящее время нормирующие документы Российской Федерации используют модели, представленные Международной комиссией по радиологической защите в Публикациях 30, 66, 67, в то время как Международной комиссией по радиологической защите разработаны новые модели и подходы, представленные в Публикациях 130, 134, 137, 141. Целью данного исследования было показать фактическую динамику выведения плутония с мочой и калом при его поступлении в составе промышленного соединения сложного изотопного состава в сравнении с расчетными данными. Материалы и методы: Для выполнения исследования в качестве исходных данных использовались результаты определения активности плутония в суточных количествах мочи и кала у трех работников с острым ингаляционным поступлением промышленных соединений плутония в результате возникновения аварийной ситуации. Результаты исследования и обсуждение: Для каждого случая с помощью критерия Акаике был выбран наиболее пригодный сценарий (модель и набор физико-химических свойств соединения). Расчеты выполнялись на основании результатов измерений активности плутония в моче, результатов измерения активности плутония в кале и результатов измерения активности плутония в моче и кале одновременно. Выполненный статистический анализ показал, что выбор наиболее пригодной модели и набора физико-химических свойств соединения обусловлен выбором исходных данных. В одном из случаев ни одна из рассмотренных моделей не позволила адекватно объяснить наблюдаемые уровни плутония в моче и кале. Заключение: Очевидно, что в настоящее время существуют пробелы в знаниях о поведении промышленных соединений плутония в организме, в том числе присутствующих на участках по производству новых видов топлива, что требует серьезных исследований как биокинетики, так и физико-химических свойств промышленных соединений плутония.*

**Ключевые слова:** плутоний, биокинетическая модель, ингаляционное поступление.

### Введение

Наиболее эффективным методом контроля доз внутреннего облучения, обусловленного поступлением плутония, является метод косвенной дозиметрии, основанный на интерпретации результатов измерений активности нуклида в экскретах [1]. Для оценки поступления и дозы внутреннего облучения от плутония для персонала используются биокинетические и дозиметрические модели, рекомендуемые Международной комиссией по ра-

диологической защите (МКРЗ). В настоящее время основные нормирующие документы НРБ-99/2009<sup>1</sup> и ОСПОРБ-99/2010<sup>2</sup> в области обеспечения радиационной безопасности, применяемые в Российской Федерации, опираются на требования и подходы, изложенные Международной комиссией по радиологической защите в Публикациях 68, 78, в которых для оценки основных нормирующих величин использованы биокинетические модели (далее стандартные модели МКРЗ), представленные в Публикациях 30, 66, 67 [2–7].

<sup>1</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534. [Radiation Safety Standards (RSS-99/2009): Sanitary Regulations and Standards SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by Decision No.47 of 07.07.2009 by Chief of Public Health of the Russian Federation). Registered in Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.09.2009, registration No.14534. (In Russ.)]

<sup>2</sup> СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): Санитарные правила и нормы (в редакции изменения № 1, утвержденного Постановлением Главного государственного врача Российской Федерации от 16.09.2013 № 43). Зарегистрировано Минюстом России 05.11.2013, регистрационный № 30309. [Sanitary Regulations 2.6.1.2612-10. Basic sanitary rules for radiation safety (BSRRS-99/2010): Sanitary regulations and standards (as amended to Change No.1 approved by Decision No.43 of 16 September 2013 by Chief of Public Health of the Russian Federation). Registered in Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No.30309. (In Russ.)]

**Соколова Александра Борисовна**

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: sokolova@subi.su

В результате процесса высокотемпературной обработки соединений, входящих в состав нового вида топлива, физико-химические характеристики аэрозолей, генерируемых на участках по его производству, а также особенности их метаболизма в организме человека, отличаются от таковых при стандартных условиях облучения. В настоящее время МКРЗ рекомендованы новые подходы и новые биокинетические и дозиметрические модели (the Occupational Intakes of Radionuclides, далее – OIR-модели), представленные в Публикациях 130, 134, 137, 141 [8–11], в Публикации 141 приведены значения параметров для расширенного набора соединений плутония, в их числе – наночастицы и смесь оксидов плутония и урана (МОКС-соединения).

**Цель исследования** – показать фактическую динамику выведения плутония с мочой и калом при его поступлении в составе промышленного соединения сложного изотопного состава в сравнении с расчетными данными, полученными при помощи стандартных биокинетических моделей и OIR-моделей, на примере трех случаев с острым ингаляционным поступлением в условиях действующего производства.

### Материалы и методы

#### Описание случаев

02.07.2019 при выполнении технологической операции в результате разгерметизации контейнера произошло ингаляционное поступление актинидов у трех работников Федерального Государственного Унитарного Предприятия «Производственное Объединение «Маяк» (ФГУП «ПО «Маяк»).

02.07.2019 около 9.30 работники приступили к выполнению технологической операции, около 11.30 при проведении радиационного контроля было обнаружено загрязнение поверхностей в зоне выполнения операции, в 11.30

был проведен радиационный контроль работников, выполнявших операцию. Около 12.00 работники произвели отмыв в санпропускнике с промежуточными замерами, после дезактивации были вновь зафиксированы повышенные уровни поверхностного загрязнения. В 13.00 работники были направлены на здравпункт для введения пентацина. Около 16.00 часов работники были направлены на внеплановое обследование в Южно-Уральский институт биофизики (в настоящее время Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики» Федерального медико-биологического агентства). Комплексное дозиметрическое обследование работников – аппаратчика (случай А), инженера-технолога (случай В), инженера по спецучету (случай С) – было выполнено в лаборатории дозиметрии внутреннего облучения в рамках специального дозиметрического контроля. Обследование выполнялось в соответствии с требованиями методических указаний<sup>3</sup>.

Исходными данными для настоящего исследования являются результаты определения содержания <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu и <sup>241</sup>Am в суточных количествах мочи (СКМ) и суточных количествах кала (СКК), собранных в период стимулированной пентацином экскреции с 02.07.2019 по 28.01.2020, а также в период последствия пентацина и естественной экскреции с 25.02.2020 по 21.03.2022. С целью получения поддерживающей информации для каждого обследуемого были выполнены прямые измерения содержания <sup>241</sup>Am в легких с использованием спектрометра излучения человека (СИЧ).

Сведения о количестве собранных и проанализированных биопроб и количестве измерений содержания <sup>241</sup>Am в легких для каждого обследуемого за период с 02.07.2019 по 21.03.2022 представлено в таблице 1.

Таблица 1. Количество проб экскретов и измерений содержания <sup>241</sup>Am в легких  
[Table 1. Number of excreta samples and measurements of <sup>241</sup>Am content in lung]

Случай [Case]	Количество проб (измерений) [Number of samples (measurements)]				Измерения содержания <sup>241</sup> Am в легких [Measurements of <sup>241</sup> Am content in the lungs]
	В период действия и последствия ДТПА [During the period of action and after-effect of ДТПА]		В период естественной экскреции [During the period of natural excretion]		
	Моча [Urine]	Кал [Feces]	Моча [Urine]	Кал [Feces]	
Случай А [Case A]	20	17	36	28	43
Случай В [Case B]	19	17	37	31	42
Случай С [Case C]	18	14	39	31	22

Для работников проводилось длительное лечение препаратом пентацин, включающее:

- ежедневное внутривенное введение пентацина с первых суток по 14-е сутки;
- затем на 16-е, 18-е, 21-е, 23-е, 25-е, 28-е, 30-е, 32-е, 35-е, 37-е, 39-е, 42-е, 58-е, 59-е, 60-е, 65-е, 66-е, 67-е, 72-е,

73-е, 74-е, 80-е, 84-е, 88-е, 94-е, 98-е, 102-е, 108-е, 112-е, 116-е, 122-е, 127-е, 130-е, 136-е, 140-е, 144-е, 150-е сутки.

Для случая С с 25-х по 50-е сутки лечение не проводилось, затем было продолжено с 50-х по 53-е сутки ежедневно и, начиная с 58-х суток, – по графику случаев А и В. Дозировка пентацина в течение всего курса была 0,5 г.

<sup>3</sup> МУ 2.6.1.034-2014. Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241. [Methodological Guidelines 2.6.1.034-2014. Order of Interaction between enterprises of State Atomic Energy Corporation “Rosatom” and organs and organizations of FMBA of Russia in case of non-standard (wound) and accidental inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes. (In Russ.)]

*Метод измерения на установках СИЧ*

Для измерения содержания америция в легких использовался стационарный СИЧ 7.5. Детекторы установки СИЧ (фирмы «Canberra» из высокочистого германия) располагаются в защитной камере для снижения воздействия внешнего излучения. Электронное оборудование расположено вне защитной камеры и соединяется посредством кабелей с детекторами. Управление электронным оборудованием, а также анализ спектрометрических данных осуществляется с помощью персонального компьютера и специального программного обеспечения – программ Genie-2000 и Abacos-2000. Для измерения активности в легких используются два детектора, детекторы устанавливаются симметрично в точках, расположенных на 20 см ниже плеча и в 10 см от центра грудины, соблюдается расположение детекторов по нормали к поверхности на расстоянии 1 см от пациента. Время измерения составляет 30 минут. Минимальная детектируемая активность в легких при стандартном времени измерения 30 минут в среднем составляет  $12,5 \pm 3,8$  Бк, но является индивидуальной для каждого измеряемого индивидуума и зависит как от антропометрических параметров измеряемого человека, так и от присутствия других радионуклидов в измеряемом органе.

*Метод биофизического обследования*

Для измерения активности изотопов плутония и  $^{241}\text{Am}$  в экскретах применялся альфа-спектрометрический метод с радиохимической подготовкой<sup>4,5</sup>. Для контроля химического выхода радионуклидов перед началом анализа в пробы вводилось известное количество меток –  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ . Разделение плутония и америция проводилось ионообменным методом на сильноосновном анионите AG1-X4. Отделение  $^{241}\text{Am}$  от примесей – Th и элементов первой и второй групп таблицы Менделеева – выполнялось методом вакуумной экстракционной хроматографии на смоле DGA-normal. Счетные образцы для альфа-спектрометра готовились методом электролитического осаждения на стальные диски диаметром 17,5 мм. Для проведения измерений использовался альфа-спектрометр ORTEC, с помощью которого проводилась регистрация энергетических спектров альфа-излучения, испускаемого исследуемыми радионуклидами в счетных образцах.

*Статистические методы сравнения моделей*

С целью сравнения качества подгонки данных моделями использовался информационный критерий Акаике (AIC) [12]. Он позволяет сравнивать и выбирать наиболее пригодные модели через функцию правдоподобия на одном наборе данных с одинаковыми весами. Наилучшая модель имеет наименьшее AIC значение среди всех. Критерий не позво-

ляет делать сравнение для разных наборов исходных данных. При вычислении предполагалось, что вариабельность ведет себя по следующей формуле:

$$A_{meas} = A_{calc} \cdot \exp(\varepsilon),$$

где  $A_{meas}$  – измеренное значение активности,  $A_{calc}$  – значение активности, вычисленное по модели,  $\varepsilon$  – вариабельность (случайная величина) с нормальным распределением. Для продолжения исследования был сделан переход к логарифмам от  $A_{meas}$ ,  $A_{calc}$  и  $\exp(\varepsilon)$ .

Предварительно производилась проверка остатков на нормальность по критерию Колмогорова [13]. Это необходимо для проверки адекватности модели и для корректного использования формул вычисления AIC значений. В данной работе был выбран 3% уровень значимости для отвержения гипотезы нормальности распределения. По таблице для распределения статистики Колмогорова и для выбранного уровня значимости находилось критическое значение для  $K(t) = 100\% - 3\%$ , т.е.  $K^{-1}(97\%) = 1,44909$ . Если статистика  $\sqrt{n}D_n$ , вычисленная по остаткам и их предположительному распределению, была больше  $K^{-1}(97\%)$ , то предположение о нормальности распределения остатков на уровне значимости 3% отвергалось; в противном случае данное предположение не отвергалось.

**Результаты и обсуждение**

К исследованию привлечены случаи с длительным периодом наблюдения, обеспеченные большим количеством исходных данных. Исходя из сведений о производственном участке, на котором произошла аварийная ситуация, и выполняемой работниками технологической операции, существует вероятность, что обращение происходило с источником, содержащим несколько видов оксидов делящихся материалов.

Для описания динамики выведения плутония с экскретами для выбранных случаев острого ингаляционного поступления использовались стандартные биокинетические модели МКРЗ (модель дыхательного тракта, представленная в 66 Публикации МКРЗ, модель желудочно-кишечного тракта 30 Публикации МКРЗ, и модель, описывающая поведение радионуклидов, попавших в кровь 67 Публикации МКРЗ) [3–5] и модели OIR. В модели OIR используется модифицированная модель дыхательного тракта 130 Публикации МКРЗ [9], предложенная вместо модели Публикации 66 МКРЗ. Пересмотренные данные по ингаляции, заглатыванию, системной биокинетике для плутония и америция представлены в 141 Публикации МКРЗ [11]. Модель желудочно-кишечного тракта Публикации 30 МКРЗ [8] заменена на модель, представленную в Публикации 100 МКРЗ [14].

<sup>4</sup> МВИ. Методика выполнения измерений изотопов плутония, америция, урана и тория в биосубстратах на спектрометре альфа-излучения системы EG&G ORTEC OCTETE PC. Свидетельство №40090.5H304 от 18.05.2005, выдано ФГУП ВНИИФТРИ. Озерск, 2006. 24 с. [Methodology for measurement of plutonium, americium, uranium and thorium isotopes in biosubstrates using EG&G ORTEC OCTETE PC alpha-radiation spectrometer. Certificate No.40090.5H304 of 18 May 2005, issued by FSUE VNIIFTRI (The Federal State Unitary Enterprise «Russian metrological institute of technical physics and radio engineering»). Ozersk; 2006. 24 p. (In Russ.)]

<sup>5</sup> МВИ. Методика выполнения измерений изотопов плутония и америция в образцах мочи и кала в условиях повышенной экскреции, стимулированной введением пентамина, у работников радиохимических производств Свидетельство №41090.2П002, выдано 26.11.2012 г. ЦММИ ФГУП ВНИИФТРИ. Озерск, 2012. [Methodology for measuring plutonium and americium isotopes in urine and feces samples under conditions of increased excretion stimulated by the administration of pentamin in workers of radiochemical production facilities. Certificate No. 41090.2П002 of 26.11.2012 issued by FSUE VNIIFTRI. Ozersk; 2012. (In Russ.)]

Для исследования были сформированы следующие наборы моделей и физико-химических свойств соединений:

- стандартная модель МКРЗ, тип соединения «медленно растворимые» (S), медианный по активности аэродинамический диаметр (АМАД) 1 мкм;
- стандартная модель МКРЗ, тип соединения S, АМАД 5 мкм;
- модель OIR, тип соединения S, АМАД 1 мкм;
- модель OIR, тип соединения S, АМАД 5 мкм;
- модель OIR, тип соединения МОКС, АМАД 1 мкм;
- модель OIR, тип соединения МОКС, АМАД 5 мкм;
- модель OIR, тип соединения наночастицы, АМАД 1 мкм;
- модель OIR, тип соединения наночастицы, АМАД 5 мкм.

В настоящем исследовании использовались все результаты измерений активности плутония в экскретах, полученные в период с 02.07.2019 по 21.03.2022. Расчеты выполнялись по результатам измерений активности плутония в моче, по результатам измерения активности плутония в кале и по результатам измерения активности плутония в моче и кале одновременно. Вследствие того, что с целью декорпорации нуклидов для работников применялся препарат пентацин

(CaNa<sub>3</sub>-ДТПА), полученные в период применения ДТПА результаты измерения содержания плутония в моче приводились к естественным уровням. Приведение результатов экскреции плутония с мочой, полученной в период применения пентацина и в период последствия, к естественным уровням возможно с помощью коэффициентов ускорения<sup>6</sup> [15] или с помощью специальных моделей поведения плутония в присутствии ДТПА [16–23]. Для целей исследования был использован единый способ приведения данных с помощью коэффициентов ускорения. Большинство исследователей сходятся во мнении, что влияние пентацина на ускорение выведения плутония с калом незначительно, поэтому при оценке поступления по результатам измерения содержания в суточном количестве кала влияние ДТПА не учитывалось.

Для каждого из наборов моделей и типов соединений был рассчитан критерий Акаике (AIC). В таблице 2 приведены сведения о наиболее пригодной модели и типе поступившего соединения для каждого набора исходных данных. Наиболее пригодная модель выбиралась на основании значения критерия Акаике: чем меньше значение критерия, тем точнее модель. При этом абсолютное значение AIC не имеет значения и только указывает на относительный порядок сравниваемых моделей.

Таблица 2. Информация о наиболее пригодной модели и типе поступившего соединения для каждого работника  
[Table 2. Information on the most suitable model and type of compounds for each employee]

Случай [Case]	Набор данных (сценарий) [Dataset (scenario)]		
	Сценарий 1 (по результатам измерения активности плутония в моче) [Scenario 1, used the results of measuring the plutonium activity in urine]	Сценарий 2 (по результатам измерения активности плутония в кале) [Scenario 2, used the results of measuring the plutonium activity in feces]	Сценарий 3 (по результатам измерения активности плутония в моче и кале) [Scenario 3, used the results of measuring the plutonium activity in urine and feces]
Случай А [Case A]	Модель: Стандартная [Model: Standard]	Модель: OIR [Model: OIR]	Модель: OIR [Model: OIR]
	АМАД: 5 мкм [AMAD: 5 μm]	АМАД: 1 мкм [AMAD: 1 μm]	АМАД: 1 мкм [AMAD: 1 μm]
	Тип соединения: S [Type: S]	Тип соединения: МОКС [Type: MOX]	Тип соединения: S [Type: S]
Случай В [Case B]	Модель: Стандартная [Model: Standard]	Модель: Стандартная [Model: Standard]	Модель: Стандартная [Model: Standard]
	АМАД: 5 мкм [AMAD: 5 μm]	АМАД: 1 мкм [AMAD: 1 μm]	АМАД: 1 мкм [AMAD: 1 μm]
	Тип соединения: S [Type: S]	Тип соединения: S [Type: S]	Тип соединения: S [Type: S]
Случай С [Case C]	Модель: OIR [Model: OIR]	Модель: OIR [Model: OIR]	Модель: OIR [Model: OIR]
	АМАД: 5 мкм [AMAD: 5 μm]	АМАД: 1 мкм [AMAD: 1 μm]	АМАД: 1 мкм [AMAD: 1 μm]
	Тип соединения: МОКС [Type: MOX]	Тип соединения: МОКС [Type: MOX]	Тип соединения: МОКС [Type: MOX]

Выполненный статистический анализ показал, что при использовании для описания биокинетики нуклида для случая С более пригодной оказалась OIR-модель, тип соединения МОКС, значение АМАД 1 мкм и 5 мкм. Для случая В более пригодной является стандартная модель МКРЗ, тип

соединения S, АМАД 1 и 5 мкм. Для случая А прослеживается наибольшее влияние исходных данных на выбор модели и типа соединения.

Для каждого анализируемого случая, для каждого сценария (таблица 2) были выполнены оценки поступления, и на их

<sup>6</sup>МУ 2.6.1.026-09. Методика расчета доз облучения персонала, обусловленных поступлением изотопов плутония и америция-241 через поврежденные кожные покровы. М.: Федеральное медико-биологическое агентство, 2009. 38 с. [Methodological Guidelines 2.6.1.026-09. Methodology for calculating personnel doses resulting from the intake of plutonium and americium-241 isotopes through damaged skin. Moscow: Federal Medical-Biological Agency; 2009. 38 p. (In Russ.)]

основе получена расчетная динамика выведения плутония с мочой и калом для каждого сценария. На рисунках 1–3 графически представлено сравнение фактических результатов измерений активности плутония в суточном количестве мочи

(а) и в суточном количестве кала (б) с расчетными оценками, полученными по сценариям, приведенным в таблице 2 для случая А (рис. 1), случая В (рис. 2) и случая С (рис. 3).

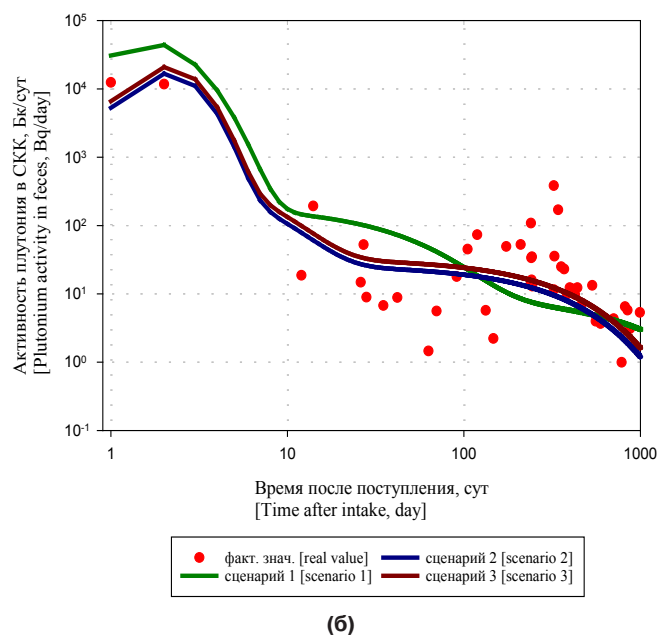
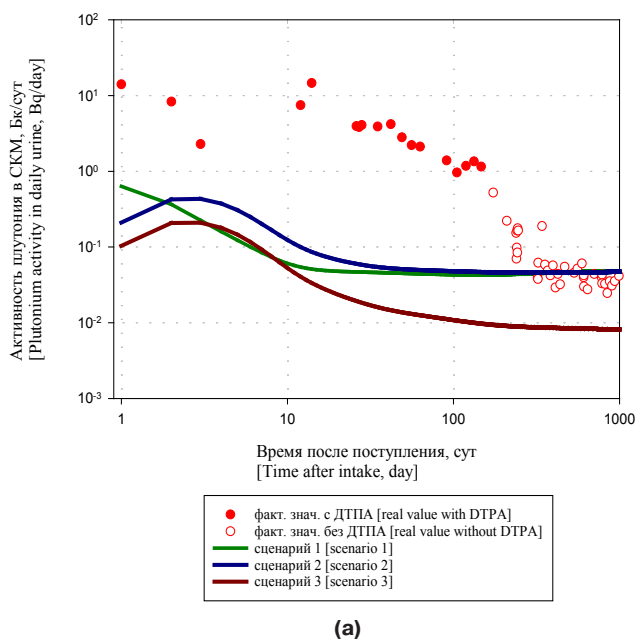


Рис. 1. Сравнение фактических результатов измерений содержания плутония в моче (а) и кале (б) с расчетными значениями для случая А

[Fig. 1. Comparison of actual results of measurements of plutonium content in urine (a) and feces (б) with calculated values for case A]

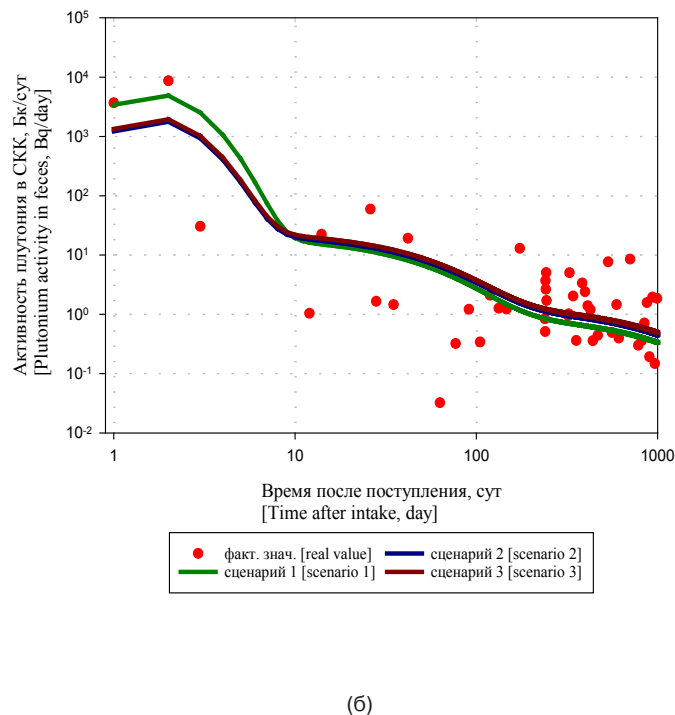
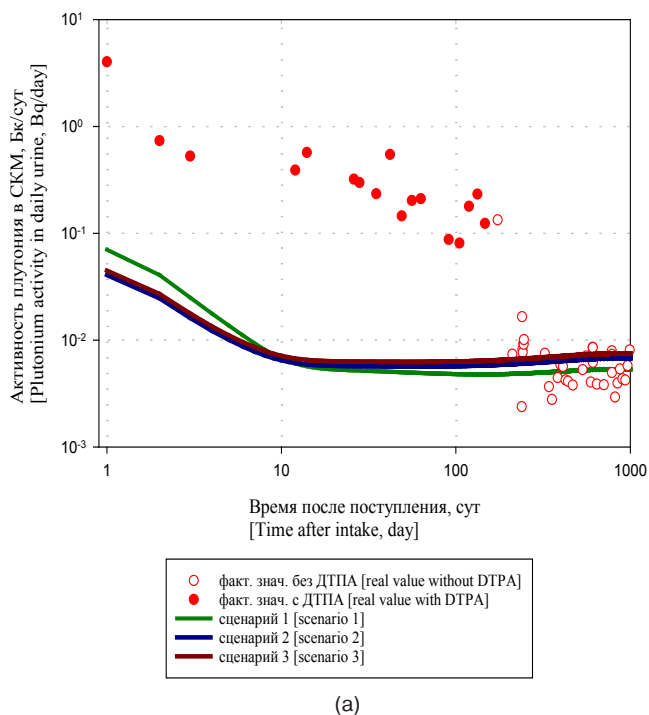


Рис. 2. Сравнение фактических результатов измерений содержания плутония в моче (а) и кале (б) с расчетными значениями для случая В

[Fig. 2. Comparison of actual results of measurements of plutonium content in urine (a) and feces (б) with calculated values for case B]

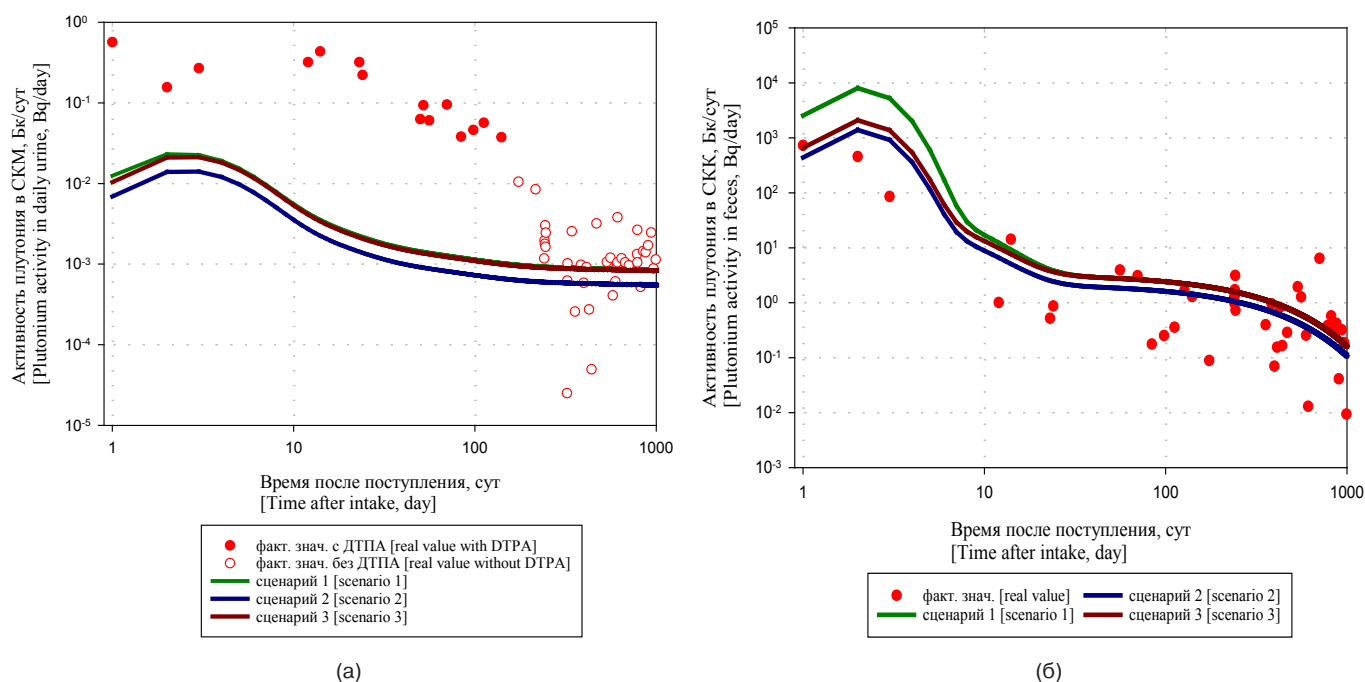


Рис. 3. Сравнение фактических результатов измерений содержания плутония в моче (а) и кале (б) с расчетными значениями для случая С

[Fig.3. Comparison of actual results of measurements of plutonium content in urine (а) and feces (б) with calculated values for case C]

Очевидно, что для случая А наблюдаемая динамика выведения нуклидов с экскретами не соответствует динамике выведения, полученной в соответствии с моделями МКРЗ, несмотря на то, что рассмотрены наиболее вероятные типы соединений, поступление которых возможно на производственном участке. При любых рассмотренных сценариях результаты измерения активности плутония в моче и кале одновременно не могут быть описаны с использованием стандартной модели МКРЗ и OIR-модели.

Возможным объяснением полученных расхождений может служить:

- большая вариабельность результатов измерений в кале. К примеру, в работе Juliao et al. показано, что масса СКК может различаться до 5,7 раз в разные дни сбора у одного и того же человека, так же как концентрация <sup>234</sup>U, которая может различаться от 1 до 30 раз [24];

- недостаточно изученное выведение нуклидов с калом в период применения ДТПА. В данном исследовании были использованы результаты измерений активности плутония в СКК, полученные в период применения ДТПА. В настоящее время считается, что влияние пентацина на ускорение выведения плутония с калом незначительно, что может не соответствовать реальности. Согласно модели поведения плутония в присутствии ДТПА Konzen et. al., при введении ДТПА в отдаленные сроки после ингаляционного поступления, выведение плутония с калом увеличивается в 3 и в 250 раз для типов S и F соответственно [20, 21]. В работе Плотниковой с соавт. при проведении клинических исследований для работников ПО «Маяк» получено ускорение выведения плутония с калом в 2-60 раз [25], ускорение выведения плутония с калом показано также в работе James et al. [26]. В настоя-

щем исследовании при использовании результатов измерений СКК в период действия ДТПА ускорение выведения плутония с калом не учитывалось;

- несоответствие значений параметров выведения плутония с калом фактическим данным. В работе Konzen et. al. [27] представлена новая модифицированная системная модель, с привлечением данных о выведении плутония с калом, которая предсказывает отличное от модели Leggett et al. [28] выведение плутония с калом в сроки 100-1000 дней после поступления;

- недостаточная изученность поведения аэрозолей плутония, присутствующих на участках по производству МОКС топлива, в организме человека, а также их поведение в присутствии в организме хелатов. В 141 Публикации МКРЗ приводятся данные, использованные для расчета параметров модели для МОКС-соединений. В основном, это экспериментальные данные, полученные на животных [29–31], и единичные исследования поведения в организме человека [32]. На основании единственного исследования поведения МОКС-соединений в организме человека, выполненного Foster et al., определено значение  $f_r = 0,05$ ,  $s_s = 2 \times 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$  [32]. В 141 Публикации МКРЗ для МОКС-соединений рекомендованы значения  $f_r = 0,004$ ,  $s_s = 1 \times 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ .

Результаты измерения содержания америция в легких использовались в данном исследовании в качестве подтверждения предположений о физико-химических свойствах поступившего соединения. Как оказалось, изотопный состав (по активности), установленный на основании данных определения активности изотопов плутония и <sup>241</sup>Am в собранных за первые после поступления сутки пробах кала, когда экскреция радионуклидов преимущественно определяется механическим клиренсом и может наиболее близко

описывать изотопный состав поступивших соединений, значительно отличался от изотопного состава, определенного в поздние сроки после поступления. Поэтому вклад  $^{241}\text{Am}$  в дозовую нагрузку определялся расчетным методом с учетом изотопного состава в период после окончания применения ДТПА и составил около 6 % от суммарной активности америция и изотопов плутония. На рисунке 4 представлено сравнение фактических результатов измерений содержания америция в легких с расчетными оценками по трем сценариям (табл. 2).

Данные, представленные на рисунке 4, не противоречат исходным предположениям о физико-химической форме поступившего соединения для случая А и случая В. Для случая С оценки, полученные по результатам измерения активности плутония в экскретатах, не соответствуют результатам, полученным при прямых измерениях содержания  $^{241}\text{Am}$  легких на установке СИЧ. Это может быть связано с тем, что большинство прямых измерений для этого случая находились на уровне НПДИ метода, а часть измерений – ниже НПДИ.

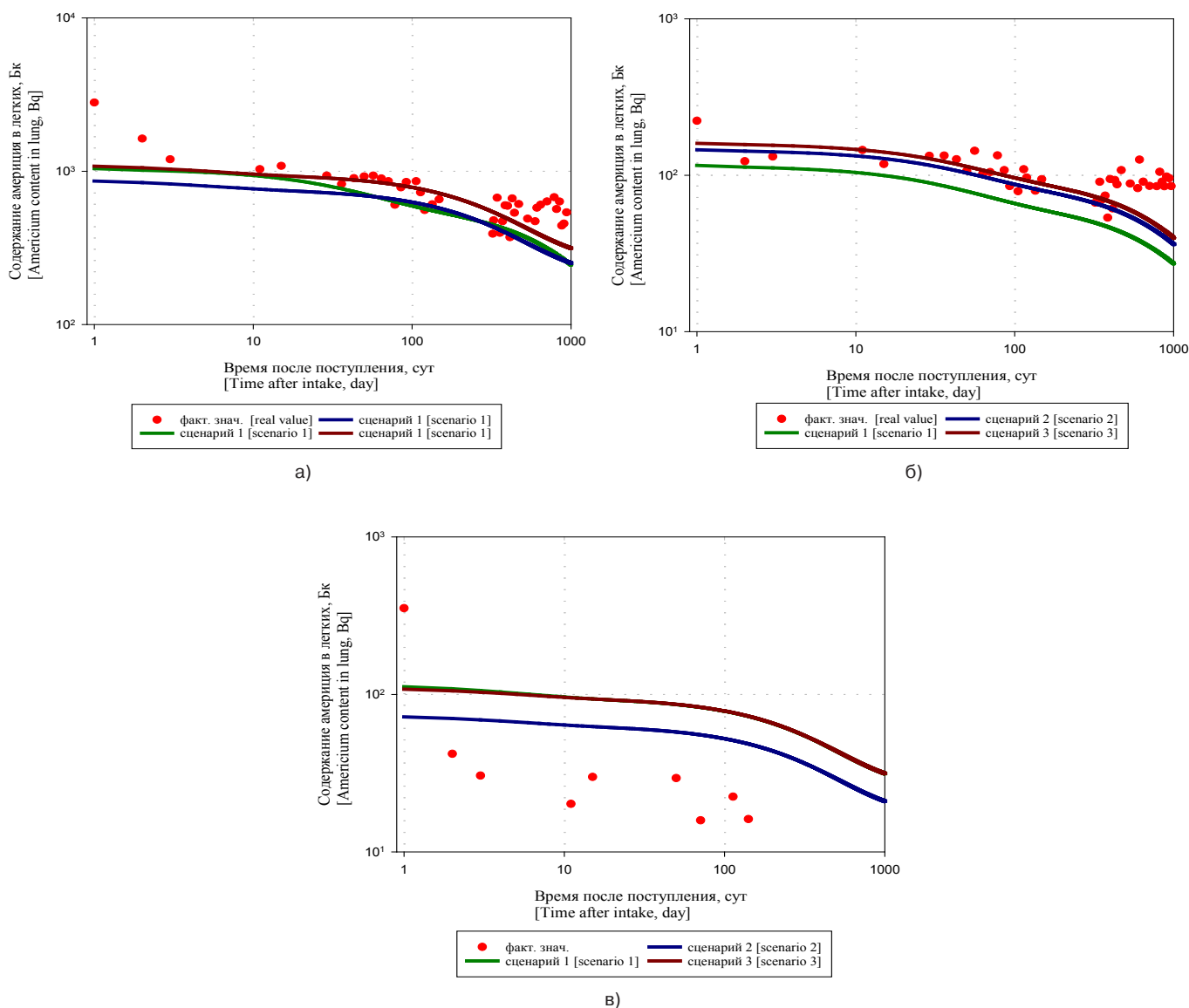


Рис. 4. Сравнение фактических результатов измерений содержания америция в легких с расчетными значениями для случая А (а), случая В (б), случая С (в)

[Fig.4. Comparison of actual results of measurements of americium content in lung with calculated values for case A (a), case B (б), case C (в)]

### Заключение

Проведенные исследования показали, что для работников, вовлеченных в одну аварийную ситуацию, не удалось подобрать единую биокинетическую модель и свойства поступившего соединения для описания фактической динамики выведения плутония с мочой и калом. В одном из рассмотренных случаев ни стандартные модели МКРЗ, ни OIR-

модели не позволили адекватно объяснить наблюдаемые уровни плутония в моче и кале. Возможно, это обусловлено пробелами в знаниях о биокинетике промышленных соединений плутония, присутствующих на участках по производству новых видов топлива, а также малой изученностью физико-химических характеристик радиоактивных аэрозолей, генерируемых на участках по производству МОКС топлива.

Изучение биокинетики поступивших соединений плутония, определение динамики формирования доз облучения тканей и органов необходимы для обоснования значимых дозовых коэффициентов, связывающих величину поступления и эффективную дозу внутреннего облучения, что, в свою очередь, необходимо для обеспечения выполнения требований по радиационной безопасности при работах с источниками, содержащим несколько видов оксидов делящихся материалов, в том числе с новыми видами ядерного топлива, в части контроля внутреннего облучения.

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

Соколова А.Б. – общее руководство выполнением работы, подготовка черновика статьи, подготовка окончательного варианта статьи.

Ефимов А.В. – анализ исходных данных, редакция промежуточного варианта статьи.

Ишунина М.В. – подготовка раздела материалы и методы, анализ исходных данных.

Сыпко С.А. – подготовка средств измерений и выполнение измерений, анализ литературных данных, редакция промежуточного варианта статьи.

#### Благодарности

Авторы благодарят А.Б. Джунушалиева за помощь при выполнении статистического анализа, а также рецензентов за тщательный анализ статьи.

#### Информация о конфликте интересов

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

#### Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках Государственного контракта от 15.06.2025 № 11.314.25.2 «Техногенное облучение и его отдаленные медицинские последствия» шифр «Последствия 25-27», финансируемого ФМБА России.

#### Литература

1. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2-4.
2. ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1 // Annals of the ICRP. 1979. Vol. 2, No 3/4.
3. ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Supplement to Part 1. Ann. ICRP 3(1-4).
4. ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 2 // Annals of the ICRP. 1980. Vol. 4, No 3/4.
5. ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66 // Annals of the ICRP. 1994. Vol. 24, No 1-3.
6. ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67 // Annals of the ICRP. 1993. Vol. 23, No 3/4.
7. ICRP. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68 // Annals of the ICRP. 1994. Vol. 24, No 4.
8. ICRP. Individual monitoring for internal exposure of workers – replacement of ICRP Publication 54. ICRP Publication 78 // Annals of the ICRP. 1997. Vol. 27, No 3/4.
9. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130 // Annals of the ICRP. 2015. Vol. 44, No 2.
10. ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134 // Annals of the ICRP. 2016. Vol. 45, No 3/4.
11. ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137 // Annals of the ICRP. 2017. Vol. 46, No 3/4.
12. ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141 // Annals of the ICRP. 2019. Vol. 48, No 2/3.
13. Motulsky H.J., Christopoulos A. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve

fitting. San Diego. CA: GraphPad Software Inc., 2003. 351 p.

13. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: Справ. изд. М.: Издательство «Финансы и статистика», 1983. 471 с.
14. ICRP. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100 // Annals of the ICRP. 2006. Vol. 36, No 1/2.
15. Халтурин Г.В., Любчанский Э.Р., Плотнокова Л.А., Демина Г.А. Определение скелетного и системного содержания плутония и нептуния в организме человека при аварийном поступлении их растворимых и относительно растворимых соединений // Вопросы радиационной безопасности. 2003. Спец. выпуск. С. 71-77.
16. Hall R.M., Poda G.A., Fleming R.R., Smith J.A. A mathematical model for estimation of plutonium in the human body from urine date influenced by DTPA therapy // Health Physics. 1978. Vol. 34. P. 419-431.
17. Bailey B.R., Eckerman K.F., Townsend L.W. An analysis of a puncture wound case with medical intervention // Radiation Protection Dosimetry. 2003. Vol. 105. P. 509-512.
18. Durbin P.W. and Schmidt C. Predicting the kinetics of chelating agents in man from animal data // Health Physics. 1989. Vol. 57. P. 165-174.
19. Stather J.W., Smith H., Bailey M.R., Birchall A., Bulman A., Crawley F.E.H. The retention of <sup>14</sup>C-DTPA in human volunteers after inhalation or intravenous injection // Health Physics. 1983. No 44 (1). P. 45-52.
20. Konzen K., Brey R. Development of the Plutonium-DTPA biokinetic model // Health Physics. 2015. Vol. 108 (6). P. 565-573.
21. Konzen K., Brey R. and Miller S. Plutonium-DTPA model application with USTUR cases 0269 // Health Physics. 2016. Vol. 110 (1). P.59-65.
22. Breustedt B., Blanchardon E., Berard P., et al. Biokinetic modeling of DTPA decorporation therapy: the CONRAD approach // Radiation Protection Dosimetry. 2009. 134. P. 38-48.
23. Breustedt B., Blanchardon E., Berard P., et al. The CONRAD approach to biokinetic modeling of DTPA decorporation therapy // Health Physics. 2010. Vol. 99(4). P. 547-552.
24. Juliao L.M., Melo Q.C., de O. Sousa W., Santos M.S., Fernandes P.C.P. Uncertainty on faecal analysis on dose assessment // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 421-424.
25. Плотнокова Л.А., Байсоголов Г.Д., Дощенко В.Н. Влияние пентамина и тетоксамина на ускорение выведения плутония из организма человека // Бюллетень радиационной медицины. 1962. № 3. С. 123-129.
26. James A.C., Sasser L.B. Stuit D.B., Glover S.E. and Carbaugh E.H. USTUR whole body case 0269: demonstrating effectiveness of I.V. Ca-DTPA for Pu // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 449-455.
27. Konzen K., Brey R., and Miller S. Plutonium-DTPA model application with USTUR Case 0269 // Health Physics. 2016. Vol. 110, No 1. P. 59-65.
28. Leggett R.W., Eckerman K.F., Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Krahenbuhl M.P., Miller S.C. Mayak worker study: An improved biokinetic model for reconstructing doses from internally deposited plutonium // Radiatation Research. 2005. 164. P. 111-122.
29. Lataillade G., Verry M., Rateau G. Translocation of Pu from rat and monkey lung after inhalation of industrial plutonium oxide and mixed U and Pu oxide // International Journal of Radiation Biology. 1995. Vol. 67. P. 373-380.
30. Ramounet B., Matton S., Guezingar-Liebard F., et al. Comparative biokinetics of plutonium and americium after inhalation of PuO<sub>2</sub> and mixed oxides (U, Pu)O<sub>2</sub> in rat // International Journal of Radiation Biology. 2000. Vol. 76. P. 215-222.
31. Stanley J.A., Eidson A.F., Mewhinney J.A. Distribution, retention and dosimetry of plutonium and americium in the rat, dog and monkey after inhalation of an industrial-mixed uranium and plutonium oxide aerosol // Health Physics. 1982. Vol. 43. P. 521-530.
32. Foster P.P. Study of a plutonium oxide fuel inhalation case // Radiation Protection Dosimetry. 1991. Vol. 38. P. 141-146.

Поступила: 28.08.2025

**Соколова Александра Борисовна** – кандидат биологических наук, главный научный сотрудник, курирующий вопросы радиационной безопасности, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: sokolova@subi.su  
ORCID: 0000-0002-6036-4178

**Ефимов Александр Владимирович** – начальник отдела, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия  
ORCID: 0000-0003-1110-6559

**Ишунина Мария Владимировна** – заведующий лабораторией, младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия  
ORCID: 0000-0002-0737-4131

**Сыпко Сергей Алексеевич** – заведующий лабораторией, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия  
ORCID: 0000-0002-8425-9460

**Для цитирования:** Соколова А.Б., Ефимов А.В., Ишунина М.В., Сыпко С.А. Динамика выведения плутония с мочой и калом на примере случаев острого ингаляционного поступления промышленных соединений плутония // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 24–33. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-24-33

## Dynamics of plutonium excretion with urine and feces using cases of acute inhalation intake of industrial plutonium compounds as an example

Alexandra B. Sokolova, Alexander V. Efimov, Mariya V. Ishunina, Sergey A. Sypko

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

*Monitoring internal doses from plutonium is most effectively accomplished by an indirect method based on the interpretation of nuclide activity measurements in excreta using biokinetic and dosimetric models. Currently, Russian Federation regulatory documents utilize the models presented by the International Commission on Radiological Protection in Publications 30, 66, and 67, while the International Commission on Radiological Protection has developed new models and approaches presented in Publications 130, 134, 137, and 141. The aim of this study was to demonstrate the actual dynamics of plutonium excretion in urine and feces in comparison with calculated data upon the intake of plutonium as part of an industrial compound of complex isotopic composition. Materials and Methods: The initial data for the study were the results of determining the activity of plutonium in daily amounts of urine and feces of three workers with acute inhalation intake of industrial plutonium compounds as a result of an emergency. Results and Discussion: For each case, the most suitable scenario (model and set of physicochemical properties of the compound) was selected using the Akaike criterion, depending on the initial data used for the calculation. The calculations were performed based on the results of plutonium activity measurements in urine, the results of plutonium activity measurements in feces, and the results of plutonium activity measurements in urine and feces simultaneously. The statistical analysis performed showed that the choice of the most suitable model and set of physicochemical properties of the compound was determined by the choice of initial data. In one case, none of the models adequately explained the observed levels of plutonium in urine and feces. Conclusion: There is undoubtedly a current lack of knowledge regarding the metabolism of industrial plutonium compounds, including those present at new fuel production sites. This requires extensive research into both the biokinetics and physicochemical properties of industrial plutonium compounds.*

**Key words:** plutonium, biokinetic model, inhalation intake.

### Authors' personal contribution

Sokolova A.B. provided general management of the project, prepared a draft of the manuscript and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Efimov A.V. analyzed of the initial data, edited the intermediate version of the manuscript.

Ishunina M.V. prepared the materials and methods section and conducted an analysis of the initial data.

Sypko S.A. prepared measuring instruments and performed measurements, analyzed of the literature data and edited the intermediate version of the manuscript.

### Acknowledgments

The authors would like to thank the A.B. Dzhunushaliev for assistance in performing statistical analysis, and the reviewers for their thorough analysis of the article.

**Alexandra B. Sokolova**

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

**Address for correspondence:** 19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Oblast, 456783, Russia; E-mail: sokolova@subi.su

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest in the conducting of the work and preparation of this article.

### Sources of funding

The work was carried out within the framework of the Government contract "Industrial radiation and its long-term medical consequences" and the population of adjacent territories" №11.001.22.800 from 15.06.2025 code "Consequences 25-27", funded by the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

### References

1. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4).
2. ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1. Limits for intakes of radionuclides by workers. *Annals of the ICRP*. 1979;2(3/4).
3. ICRP Publication 30, Supplement to Part 1. Ann. ICRP 3(1-4). ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 2. *Annals of the ICRP*. 1980;4(3/4).
4. ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. *Annals of the ICRP*. 1994;24(1-3).
5. ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. *Annals of the ICRP*. 1993;23(3/4).
6. ICRP. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. *Annals of the ICRP*. 1994;24(4).
7. ICRP. Individual monitoring for internal exposure of workers – replacement of ICRP Publication 54. ICRP Publication 78. *Annals of the ICRP*. 1997;27(3/4).
8. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. *Annals of the ICRP*. 2015;44(2).
9. ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. *Annals of the ICRP*. 2016;45(3/4).
10. ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Annals of the ICRP*. 2017;46(3/4).
11. ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141. *Annals of the ICRP*. 2019;48(2/3).
12. Motulsky HJ, Christopoulos A. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve fitting. San Diego. CA: GraphPad Software Inc. 2003; 351 p.
13. Ayvazyan SA, Enyukov IS, Meshalkin LD. Applied statistics: Modeling basics and primary data processing: Reference Book. Moscow: Finance and Statistics; 1983. 471 p. (In Russian).
14. ICRP. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. *Annals of the ICRP*. 2006;36(1/2).
15. Khalturin GV, Lyubchansky ER, Plotnikova LA, Demina GA. Determination of skeletal and systemic content of plutonium and neptunium in the human body in case of accidental intake of their soluble and relatively soluble compounds. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2003; Special Edition: 71-77. (In Russian).
16. Hall RM, Poda GA, Fleming RR, Smith JA. A mathematical model for estimation of plutonium in the human body from urine date influenced by DTPA therapy. *Health Physics*. 1978;34: 419-431.
17. Bailey BR, Eckerman KF, Townsend LW. An analysis of a puncture wound case with medical intervention. *Radiation Protection Dosimetry*. 2003;105: 509–512.
18. Durbin PW. and Schmidt C. Predicting the kinetics of chelating agents in man from animal data. *Health Physics*. 1989;57: 165-174.
19. Stather JW, Smith H, Bailey MR, Birchall A, Bulman A, Crawley FEH. The retention of <sup>14</sup>C-DTPA in human volunteers after inhalation or intravenous injection. *Health Physics*. 1983;44(1): 45–52.
20. Konzen K, Brey R. Development of the Plutonium-DTPA biokinetic model. *Health Physics*. 2015;108(6): 565-573.
21. Konzen K, Brey R, Miller S. Plutonium-DTPA model application with USTUR cases 0269. *Health Physics*. 2016;110(1): 59-65.
22. Breustedt B, Blanchardon E, Berard P, Fritsch P, Guissani A, Lopez M, et al. Biokinetic modeling of DTPA decorporation therapy: the CONRAD approach. *Radiation Protection Dosimetry*. 2009;134: 38-48.
23. Breustedt B, Blanchardon E, Berard P, Fritsch P, Guissani A, Lopez M, et al. The CONRAD approach to biokinetic modeling of DTPA decorporation therapy. *Health Physics*. 2010;99(4): 547-552.
24. Juliao LM, Melo QC, de O. Sousa W, Santos MS, Fernandes PCP. Uncertainty on faecal analysis on dose assessment. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127(1-4): 421–424.
25. Plotnikova LA, Baisogolov GD, Doshchenko VN. Effect of pentacyn and tetoxacyn on acceleration of plutonium elimination from human organism. *Byulleten radiatsionnoy meditsiny = Bulletin of Radiation Medicine*. 1962;3; 123-129. (In Russian).
26. James AC, Sasser LB, Stuit DB, Glover SE, Carbaugh EH. USTUR whole body case 0269: demonstrating effectiveness of I.V. Ca-DTPA for Pu. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127(1-4): 449-455.
27. Konzen K, Brey R, Miller S. Plutonium-DTPA model application with USTUR Case 0269. *Health Physics*. 2016;110(1): P. 59–65.
28. Leggett RW, Eckerman KF, Khokhryakov VF, Suslova KG, Krahenbuhl MP, Miller SC. Mayak worker study: An improved biokinetic model for reconstructing doses from internally deposited plutonium. *Radiation Research*. 2005;164: 111–122.
29. Lataillade G, Verry M, Rateau G. Translocation of Pu from rat and monkey lung after inhalation of industrial plutonium oxide and mixed U and Pu oxide. *International Journal of Radiation Biology*. 1995;67: 373–380.
30. Ramounet B, Matton S, Guezingar-Liebard F, Abram MC, Rateau G, Grillon G, et al. Comparative biokinetics of plutonium and americium after inhalation of PuO<sub>2</sub> and mixed oxides (U, Pu)O<sub>2</sub> in rat. *International Journal of Radiation Biology*. 2000;76: 215–222.
31. Stanley JA, Eidson AF, Mewhinney JA. Distribution, retention and dosimetry of plutonium and americium in the rat, dog and monkey after inhalation of an industrial-mixed uranium and plutonium oxide aerosol. *Health Physics*. 1982;43: 521–530.
32. Foster PP. Study of a plutonium oxide fuel inhalation case. *Radiation Protection Dosimetry*. 1991;38: 141–146.

Received: August 28, 2025

**For correspondence:** Alexandra B. Sokolova – Candidate of Biological Sciences, Chief Researcher in Charge of Radiation Safety Issues, Science Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency (19, Ozerskoe shosse, Ozersk, Chelyabinsk oblast, 456783, Russia; E-mail: sokolova@subi.su)  
ORCID: 0000-0002-6036-4178

**Alexander V. Efimov** – Head of Department - Researcher, Science Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia  
ORCID: 0000-0003-1110-6559

**Mariya V. Ishunina** - Head of Laboratory – Junior Researcher, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia  
ORCID: 0000-0002-0737-413

**Sergey A. Sypko** - Head of Laboratory – Researcher, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia  
ORCID: 0000-0002-8425-9460

**For citation:** Sokolova A.B., Efimov A.V., Ishunina M.V., Sypko S.A. Dynamics of plutonium excretion with urine and feces using cases of acute inhalation intake of industrial plutonium compounds as an example. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 24–33. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-24-33

## Особенности облучения персонала при выполнении работ по ремонту атомных морских объектов

Кожухова Н.А., Балтрукова Т.Б., Арефьева Д.В.

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

*Стратегия развития отечественной судостроительной промышленности предполагает многократное увеличение объемов ремонта атомных морских объектов, что актуализирует задачи по обеспечению радиационной безопасности персонала. Цель исследования – определить условия и уровни воздействия ионизирующего излучения на рабочих местах различных категорий персонала предприятия атомного судоремонта, в том числе при повышенной производственной нагрузке. Материалы и методы: Исследование проводилось на крупном предприятии атомного судоремонта. На рабочих местах основного, вспомогательного и административного персонала (группа А) измеряли мощность Ambientного эквивалента дозы гамма-излучения и уровни бета-загрязнения. Проанализированы данные радиационного контроля предприятия и пятилетние статистические формы №1-ДОЗ (2016–2020 гг.). Для оценки максимально возможных доз использовались индивидуальные термомюлюминесцентные дозиметры. Результаты исследования и обсуждение: В периоды отсутствия радиационно-опасных работ мощность Ambientного эквивалента дозы на большинстве рабочих мест не превышала фоновых значений (0,16 мкЗв/ч), за исключением зоны у цистерны с жидкими радиоактивными отходами (до 6,75 мкЗв/ч). При выполнении потенциально опасных работ (обслуживание первого контура, демонтаж механизмов защиты) мощность Ambientного эквивалента дозы достигала 4,91–7,15 мкЗв/ч. Наибольшие среднегодовые индивидуальные эффективные дозы за пятилетие зарегистрированы у дефектоскопистов (6,89 мЗв/год). Расчет для условий полной производственной загрузки выявил гипотетический риск превышения пределов доз для некоторых специальностей (слесарь-монтажник, дефектоскопист), особенно для хрусталика глаза. Заключение: Условия облучения персонала существенно различаются в зависимости от профессии и вида работ. Для обеспечения радиационной безопасности необходим дифференцированный подход к планированию ремонтных работ с учетом специальности персонала, характера операций и строгого соблюдения регламентов, особенно в периоды высокой нагрузки и для групп повышенного риска.*

**Ключевые слова:** персонал, воздействие ионизирующего излучения, предприятия атомного судоремонта, атомные морские объекты, радиационная безопасность, доза облучения.

### Введение

Стратегия развития отечественной судостроительной промышленности на период до 2036 года и дальнейшую перспективу до 2050 года предполагает кратное увеличение мощностей предприятий, выполняющих судоремонтные работы. Это связано с ростом объемов ввода в строй новых судов, в том числе атомных морских объектов (АМО), используемых для промышленного освоения и обеспечения безопасности в Арктической зоне Российской Федерации.

Технологические процессы ремонта АМО в целом аналогичны таковым при ремонте иных судов морского и речного флота. Однако из-за наличия ядерных энергетических установок и связанных с ними системами и устройствами, обеспечивающими их бесперебойную работу и радиационную защиту экипажа, возникает необходимость обеспечения ядерной и радиационной безопасности персонала предприятий атомного судоремонта на всех этапах выполнения ремонтных работ [1–3].

При ремонте АМО работники, с одной стороны, подвергаются воздействию различных вредных и (или) опасных

производственных факторов, типичных для предприятий судостроительной отрасли в целом: неблагоприятный микроклимат, производственный шум, локальная и общая вибрация, повышенные концентрации сварочных аэрозолей и иных химических веществ в воздухе рабочей зоны, высокие тяжесть труда и напряженность трудового процесса [4–6]. С другой стороны, они подвергаются воздействию ионизирующего излучения при выполнении работ в зоне строгого режима (ЗСР) - цехах, участках, помещениях, предназначенных для работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующего излучения [1, 7, 8].

При разработке мер защиты от негативного влияния производственных радиационных факторов необходимо учитывать условия и уровни облучения на рабочих местах работников конкретных профессиональных категорий, которые могут существенно различаться, обуславливая различия радиационных рисков.

**Цель исследования** – определить условия и уровни воздействия ионизирующего излучения на рабочих местах различных категорий персонала предприятия атомного судоремонта, в том числе при повышенной производственной нагрузке.

**Кожухова Наталья Александровна**

Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины

Адрес для переписки: 196143, Россия, Санкт-Петербург, проспект Юрия Гагарина, д. 65; E-mail: lab2niipmm@yandex.ru

## Материалы и методы

Исследования выполнены на рабочих местах персонала крупного предприятия атомного судоремонта в Северо-Западном федеральном округе Российской Федерации.

Были обследованы рабочие места персонала группы А следующих профессиональных групп:

- специалистов основных профессий, непосредственно работающих в зоне воздействия ионизирующего излучения, в том числе в ЗСР: сварщиков, сварщиков-монтажников, электромонтеров, демонтировщиков, монтажников, газорезчиков, слесарей-монтажников;

- вспомогательного персонала, принимающего участие в обеспечении работы основного персонала и (или) контролирующего качество его работы и безопасность: регулировщиков радиационной аппаратуры, дежурных вахтенной службы, дежурных по АМО, дежурных в ЗСР, вахтенных взрывопожароопасных работ, уборщиц, дозиметристов;

- административного персонала – сотрудников, обеспечивающих эффективное функционирование производства, занимающихся работой в офисных помещениях, но по своим должностным обязанностям посещающих участки территории, сооружения и помещения, расположенные в ЗСР: начальник отдела лаборатории внешней среды, начальник дозиметрической службы и другие.

Уровни ионизирующего излучения определяли на рабочих местах основного, вспомогательного и административного персонала при выполнении работ на этапах подготовки к ремонту, непосредственно ремонта и завершения ремонта АМО. Рабочие места персонала располагались как в ЗСР, так и за ее пределами.

На рабочих местах определяли мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения и уровни загрязнения рабочих поверхностей бета-излучающими радионуклидами.

Измерение МАЭД гамма-излучения проводили с использованием спектрометра МКС-АТ6102А в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации на прибор<sup>1</sup> и МУ 2.6.5.008-2016 «Контроль радиационной обстановки. Общие требования»<sup>2</sup>. Измерения проводили в положении «стоя» в каждой точке на четырех высотах от пола: 0,1 м (на уровне стоп), 1 м (на уровне таза), 1,4 м (на уровне груди) и 1,7 м (на уровне головы).

Определение уровней загрязнения рабочих поверхностей бета-излучающими радионуклидами проведено на ос-

нове измерений плотности потока бета-частиц с использованием дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации на прибор<sup>3</sup>, МУ 2.6.5.032-2017 «Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей»<sup>4</sup>.

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

Помимо собственных исследований для более полного анализа радиационной обстановки на предприятии атомного судоремонта были использованы данные, предоставленные отделом ядерной и радиационной безопасности (ОЯРБ) предприятия за 2020 год.

Оценку и анализ индивидуальных эффективных доз облучения персонала, занятого в работах по ремонту АМО, проводили по данным статистических отчетных форм № 1-ДОЗ «Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях нормальной эксплуатации организациями техногенных источников ионизирующих излучений»<sup>5</sup> за пять лет (2016–2020 гг.).

Учитывая, что объем и порядок выполнения работ по ремонту АМО на предприятии зависит от состояния ремонтируемой техники, вида, объема и графика проведения этих работ в общем комплексе ремонта, дозы облучения персонала могут колебаться от года к году. Поэтому для более объективной оценки годовых индивидуальных доз внешнего облучения персонала рассчитывали среднегодовые дозы облучения персоналом за пять лет.

Также была определена максимально возможная доза облучения персонала при максимальной (полной) производственной нагрузке. Для этого дополнительно были проведены измерения индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения на все тело, хрусталик и кожу у персонала с помощью индивидуальных термолюминесцентных дозиметров для отдельных профессиональных групп, накопленных в течение 30 рабочих смен при выполнении радиационно-опасных работ с последующим расчетом показателя. При расчетах принималось, что рабочая смена персонала группы А составляет 7 ч, стандартное время облучения в течение календарного года – 1700 ч/год<sup>6</sup>. Дозиметры ДТЛ-02 размещали на нагрудном кармане работника, дозиметр МКД (тип А) – на уровне глаз (на каске или защитных очках), дозиметр МКД (тип Б) – на защитных перчатках<sup>7,8</sup>. Выбор дозиметров для проведения исследования осуществлялся на основе данных, представленных в научных статьях [9–11].

<sup>1</sup>Руководство по эксплуатации на спектрометр МКС-АТ6102А. Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ». Беларусь, г. Минск, 2012. 86 с. [User Manual for the MKS-AT6102A Spectrometer. Scientific and Production Unitary Enterprise ATOMTECH. Belarus, Minsk; 2012. 86 p. (In Russ.)]

<sup>2</sup>Методические указания МУ 2.6.5.008-2016 Контроль радиационной обстановки. Общие требования. М.: ФМБА России, 2016. [Methodological Guidelines MU 2.6.5.008-2016 Radiation Monitoring. General requirements. Moscow: FMBA of Russia; 2016. (In Russ.)]

<sup>3</sup>Руководство по эксплуатации на дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М. Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ». Беларусь, Минск, 2011. 117 с. [User Manual for the MKS-AT6102A Spectrometer. Scientific and Production Unitary Enterprise ATOMTECH. Belarus, Minsk, 2011. 117 p. (In Russ.)]

<sup>4</sup>Методические указания МУ 2.6.5.032-2017 Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей. М.: ФМБА России, 2017. [Methodological Guidelines MU 2.6.5.032-2017 Control of Radioactive Contamination of Surfaces. Moscow: FMBA of Russia; 2017. (In Russ.)]

<sup>5</sup>Методические рекомендации «Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения №1-ДОЗ». М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. [Methodological recommendations «Filling out forms of federal state statistical observation No. 1-DOZ». Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор, 2013. (In Russ.)]

<sup>6</sup>Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 No 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный No 14534). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPIN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

<sup>7</sup>Методика выполнения измерений эквивалента индивидуальной дозы фотонного излучения ФР. 1.38.2011.10714. Санкт-Петербург: ФГУП НИИ ПММ, 2011. 8 с. [Method for measuring the individual dose equivalent of photon radiation FR. 1.38.2011.10714. Saint Petersburg: FSUE Research Institute of PMM; 2011. 8 p. (In Russ.)]

<sup>8</sup>Методика измерений доз фотонного и бета-излучения в коже пальцев рук, лица и хрусталика глаза у персонала с использованием дозиметров из состава дозиметрической термолюминесцентной установки ДВГ-02ТМ (свидетельство об аттестации методики № 40090.2Г 082). Москва: ООО НПП «Доза», 2012. 19 с. [Methodology for measuring photon and beta radiation doses in the skin of the fingers, face, and lens of the eye of personnel using dosimeters from the DVG-02TM dosimetric thermoluminescent unit (certificate of methodology certification No. 40090.2G 082). Moscow: Dosa NPP LLC; 2012. 19 p. (In Russ.)]

### Результаты и обсуждение

Условия профессионального облучения персонала предприятия определяются технологическими особенностями атомного судоремонта. Работы, связанные с обслуживанием и ремонтом ядерных энергетических установок АМО, включают в себя выгрузку и загрузку ядерного топлива в реактор, обслуживание системы охлаждения, ремонт или замену элементов реактора и системы охлаждения.

Работы по ремонту АМО в зависимости от этапа проводятся в доках, цехах (эллингах) и на спецнабережной предприятия.

На ремонтируемых АМО проводятся следующие радиационно-опасные и потенциально опасные работы:

- выгрузка/загрузка ядерного топлива (при необходимости),
- обеспечение хранения первого контура (замена воды, консервирующего раствора и отбор проб),
- гидравлические испытания первого контура,
- демонтаж исполнительных механизмов аварийной защиты,
- дренирование первого контура,
- демонтаж приводов компенсирующих групп,
- обеспечение хранения ядерных паропроизводящих установок с загруженными активными зонами реакторов (отбор проб левого и правого бортов, замена консервирующего раствора).

Кроме этого, при проведении ремонтных работ в цехах и на спецнабережной регулярно проводятся работы по гамма-графированию сварных швов с помощью гамма-дефектоскопов.

Особенностью ремонта АМО является тот факт, что при выполнении работ воздействию ионизирующего излучения подвергается не только основной, но и вспомогательный персонал предприятия.

Измерения МАЭД гамма-излучения и плотности потока бета-частиц, выполненные на различных этапах ремонта АМО в период отсутствия работ, связанных с ядерной энергетической установкой, и после проведения дезактивации помещений, показали, что на рабочих местах персонала основных и вспомогательных профессий значения МАЭД колебались в пределах 0,03–0,17 мкЗв/ч и в помещениях АМО были значительно ниже фоновых значений, характерных для предприятия (в среднем 0,16 мкЗв/ч), что связано с конструктивными особенностями ремонтируемых объектов и экранированием фона используемыми конструкционными материалами. Плотность потока бета-частиц не превышала 10 част./см<sup>2</sup>×мин) на всех рабочих местах основного, вспомогательного и административного персонала.

Однако в цехе ремонта АМО у цистерны с жидкими радиоактивными отходами в условиях отсутствия проведения радиационно-опасных работ и после дезактивации помещений МАЭД статистически значимо ( $p < 0,001$ ) превышала значения на остальных рабочих местах в цехе на всех измеренных высотах. Значения МАЭД на рабочих местах у цистерны составили:  $6,75 \pm 0,02$  мкЗв/ч,  $6,75 \pm 0,04$  мкЗв/ч,  $1,85 \pm 0,02$  мкЗв/ч и  $1,02 \pm 0,01$  мкЗв/ч на высоте 0,1; 1,0; 1,4; 1,7 м от пола соответственно. Наибольшие значения, зафиксированные на высоте 0,1 и 1,0 м, были обусловлены неполным заполнением цистерны жидкими радиоактивными отходами и образованием более концентрированного осадка на их дне, в связи с чем

при дальнейшем заполнении цистерны можно ожидать повышения уровня МАЭД и на более высоких отметках.

Таким образом, на всех этапах выполнения ремонта АМО (в период отсутствия работ с ядерными энергетическими установками) средние значения МАЭД гамма-излучения на рабочих местах персонала основных и вспомогательных профессий не превышали фоновых значений (0,16 мкЗв/ч), за исключением рабочего места у цистерны с жидкими радиоактивными отходами –  $4,10 \pm 0,56$  мкЗв/ч.

Средние уровни МАЭД гамма-излучения на рабочих местах административного персонала предприятия составляли  $0,04 \pm 0,02$  мкЗв/ч.

По данным радиационного контроля ОЯРБ, максимальные значения за исследуемый период МАЭД гамма-излучения были зарегистрированы при проведении потенциально опасных работ (работы, обеспечивающие хранение первого контура (отбор проб), демонтаж исполнительных механизмов аварийной защиты, дренирование первого контура, демонтаж приводов компенсирующих групп). Они достигали на технической площадке в ЗСР  $4,91$  мкЗв/ч и в прочном корпусе реакторного отсека –  $6,0$  мкЗв/ч. При выполнении работ, связанных с хранением паропроизводящей установки с загруженными активными зонами реакторов (замена консервирующего раствора), максимальная МАЭД в носовой и кормовой аппаратной выгородках и на технической площадке в ЗСР составляла  $7,15$  мкЗв/ч.

Наиболее часто повторяющейся радиационно-опасной работой является проведение радионуклидной дефектоскопии, в выполнении которой участвует персонал по специальности «дефектоскописты рентгено- и гамма-графирования». При транспортировке оборудования и выполнении работ по радионуклидной дефектоскопии средние значения МАЭД существенно различались и составляли  $10,16 \pm 4,63$  мкЗв/ч и  $466,70 \pm 326,68$  мкЗв/ч соответственно [7, 8].

Распределение среднегодовых значений индивидуальных эффективных доз облучения персонала (по данным отчетных форм № 1-ДОЗ) в целом по предприятию и аппроксимация их логнормального распределения представлены на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, превышение значения 2 мЗв/год установлено в среднем у 10,5 % персонала (193 человека), что свидетельствует о том, что значения индивидуального эквивалента дозы облучения персонала группы А значительно ниже пределов доз облучения, установленных СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)»<sup>6</sup>.

Результаты анализа формы № 1-ДОЗ показали, что среднегодовые индивидуальные эффективные дозы внешнего облучения различались в зависимости от профессиональной группы. Так, у персонала основной группы они находились в пределах от 0,14 мЗв/год до 6,89 мЗв/год, у вспомогательного персонала – в пределах от 0,28 мЗв/год до 2,46 мЗв/год, а у административного – от 0,14 мЗв/год до 3,57 мЗв/год.

В связи с существенной вариабельностью продолжительности выполнения работ, включая деятельность в ЗСР, обусловленной различиями профессиональных обязанностей, характером и объемом производственных операций, был осуществлен анализ среднегодовых индивидуальных доз внешнего облучения персонала различных специальностей (рис. 2–4).

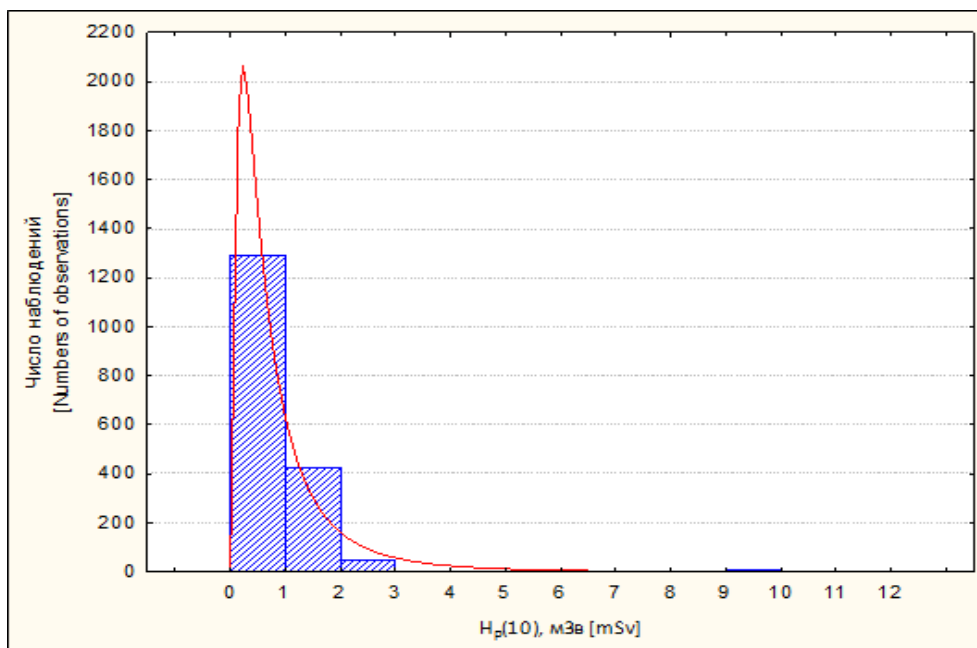


Рис. 1. Распределение среднегодовых значений индивидуальных эффективных доз облучения персонала и аппроксимация их логнормального распределения за 2016–2020 гг.

[Fig. 1. Analysis of annual mean individual effective dose distribution among personnel with log-normal distribution approximation, 2016–2020]

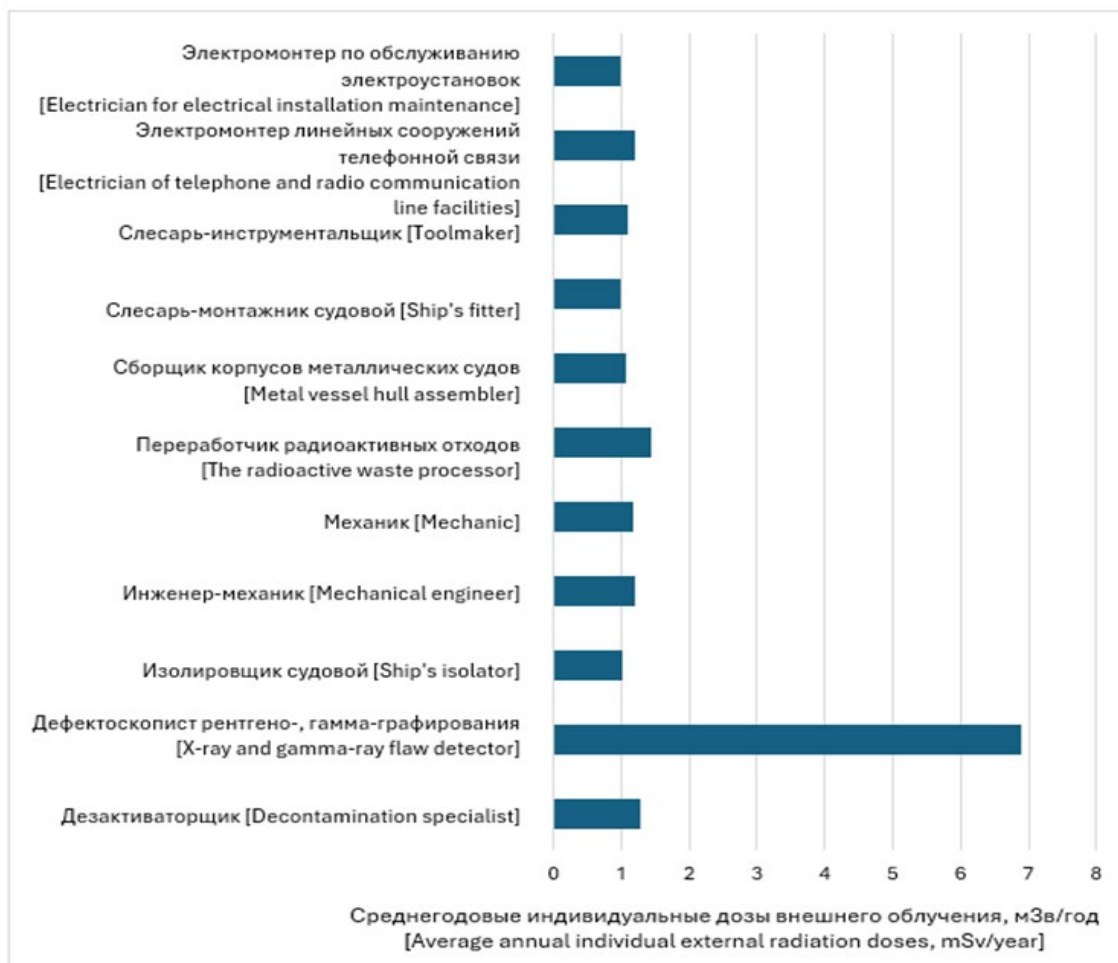


Рис. 2. Среднегодовые значения индивидуальных эффективных доз внешнего облучения специалистов основных профессий за 2016–2020 гг.

[Fig. 2. Yearly average individual effective doses of external radiation exposure for key occupational groups, 2016–2020]

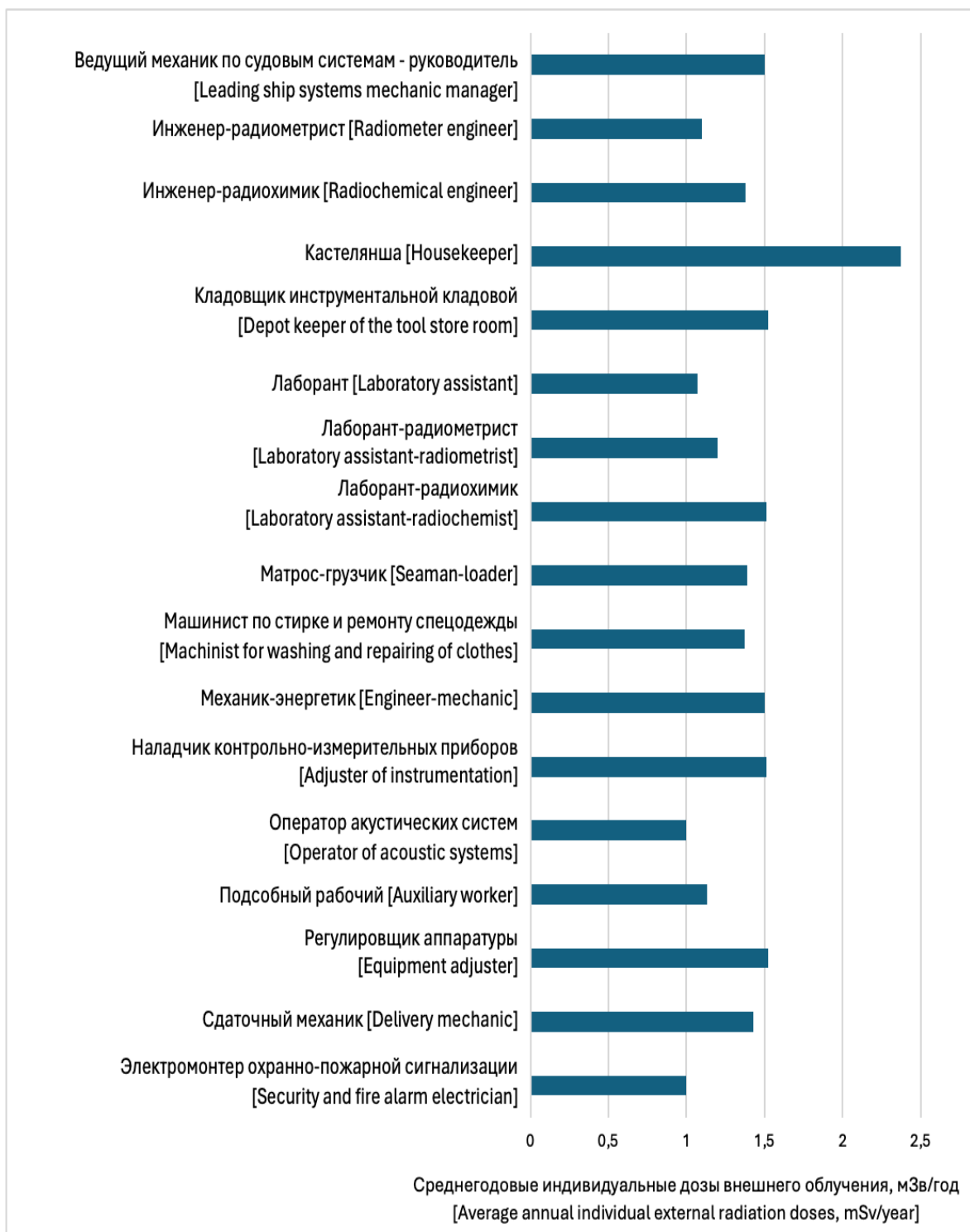


Рис. 3. Среднегодовые значения индивидуальных эффективных доз внешнего облучения вспомогательного персонала за 2016–2020 гг.

[Fig. 3. Yearly average individual effective doses of external exposure for support staff, 2016– 2020]

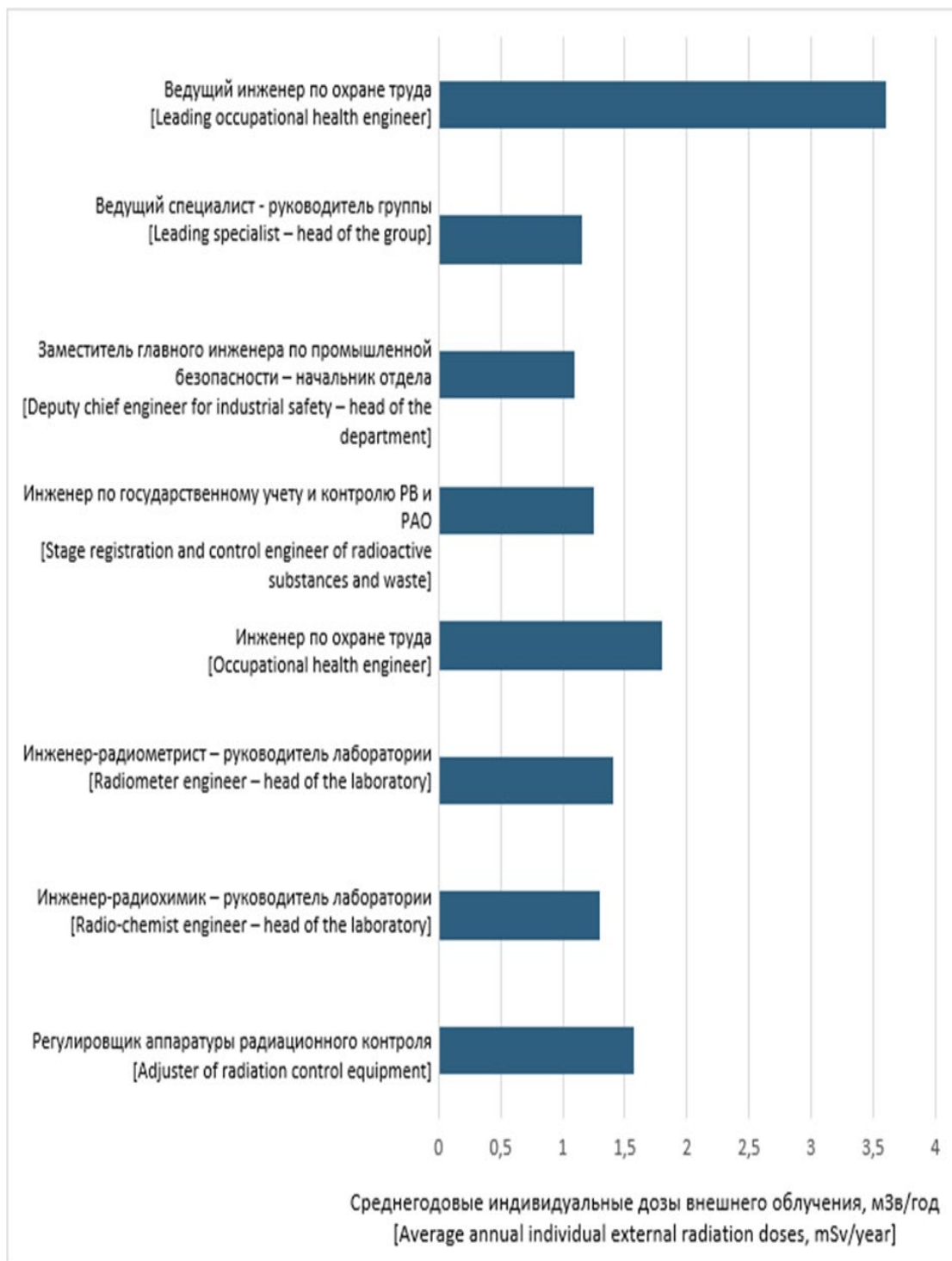


Рис. 4. Среднегодовые значения индивидуальных эффективных доз внешнего облучения административного персонала за 2016–2020 гг.

[Fig. 4. Yearly average individual effective doses of external exposure for administrative staff, 2016–2020]

Как видно из рисунков 2–4, наибольшие среднегодовые индивидуальные эффективные дозы внешнего облучения за последовательные пять лет были зарегистрированы у персонала следующих специальностей:

- дефектоскописты рентгено-, гамма-графирования (персонал основных профессий),
- кастелянши (вспомогательный персонал),
- ведущий инженер по охране труда (административный персонал).

Наиболее высокие среднегодовые индивидуальные эффективные дозы внешнего облучения были зафиксированы у дефектоскопистов рентгено-, гамма-графирования – 6,89 мЗв/год, что, тем не менее, не превышало основной дозовый предел облучения, установленного для персонала группы А<sup>6</sup>.

Учитывая, что индивидуальная доза облучения персонала зависит от объема и времени выполнения работ, связанных с источниками ионизирующего излучения, а их периодичность на предприятия атомного судоремонта в настоящее время носит не постоянный, а периодически характер, были рассчитаны максимально возможные дозы облучения ряда специалистов при их полной (максимальной) занятости на таких работах в течение года.

Результаты определения максимально возможных годовых индивидуальных доз внешнего облучения специалистов

отдельных профессиональных групп – «слесарь-монтажник» и «дефектоскопист» представлены в таблице.

Расчет показал, что при непрерывной полной загрузке персонала группы А на радиационно-опасных работах эти дозы могут превысить установленные нормативные пределы. Однако следует особо отметить, что в реальной производственной практике такие условия крайне редко реализуются. Работы с источниками ионизирующего излучения выполняются эпизодически, с перерывами, и сопровождаются мерами контроля и защиты, что существенно снижает полученные дозы.

Таким образом, результаты моделирования отражают скорее гипотетический «верхний предел» дозовой нагрузки, обеспечивая важный ориентир для оценки профессионального риска и планирования мероприятий по радиационной безопасности. Эти данные подтверждают, что при соблюдении существующих режимов работы фактическое облучение специалистов значительно ниже максимальных возможных и не превышает основных пределов доз. Однако, учитывая тенденции к увеличению необходимости проведения ремонтных работ АМО на предприятиях судоремонта, в том числе проведения радиационно-опасных работ, полученные данные могут служить неким ориентиром для обоснования дальнейшего совершенствования мер по обеспечению радиационной безопасности и охране здоровья персонала.

Таблица. Индивидуальные эквивалентные дозы внешнего облучения слесарей монтажников и дефектоскопистов судоремонтного предприятия за одну рабочую смену и расчетные потенциальные дозы их облучения на год

[Table. Individual equivalent doses of external radiation for fitter-installers and non-destructive testing inspectors at a ship repair factory during a single work shift, and estimated potential doses of radiation for the year]

Специальность [Specialization]	Эквивалентная доза внешнего облучения, мЗв [Equivalent dose of external radiation, mSv]					
	на все тело, мЗв [on the entire body, mSv]		на хрусталик, мЗв [on the lens, mSv]		на кожу кистей рук, мЗв [on the skin of the hands, mSv]	
	за смену <sup>1</sup> [per shift]	за год <sup>2</sup> [per year]	за смену <sup>1</sup> [per shift]	за год <sup>2</sup> [per year]	за смену <sup>1</sup> [per shift]	за год <sup>2</sup> [per year]
Слесарь-монтажник [Fitter-installer]	0,10 ± 0,02	24,29	0,04 ± 0,02	9,71	0,03 ± 0,01	7,29
Дефектоскопист [Non-destructive testing inspector]	0,32 ± 0,05	77,71	0,37 ± 0,08	89,86	2,20 ± 1,01	534,29

<sup>1</sup> Среднее значение со стандартным среднеквадратичным отклонением [Average value with standard deviation]

<sup>2</sup> Из расчета, что стандартное время облучения в течение календарного года – 1700 ч/год [Based on the calculation that the standard exposure time during a calendar year is 1700 hours/year]

### Заключение

В ходе исследования установлено, что на предприятиях судоремонта на рабочих местах основного, вспомогательного и административного персонала при выполнении всех этапов ремонта АМО в условиях отсутствия проведения радиационно-опасных работ и после дезактивации помещений уровни МАЭД не превышали допустимых уровней. На рабочем месте у цистерны с жидкими радиоактивными отходами МАЭД была статистически значимо выше ( $p \leq 0,001$ ), чем на остальных рабочих местах на высоте 0,1 и 1,0 м от пола, но не превышала  $6,75 \pm 0,04$  мкЗв/ч. Плотность потока бета-частиц на всех рабочих местах персонала была меньше 10 част./((см<sup>2</sup>×мин).

В связи с зарегистрированными низкими значениями МАЭД в помещениях АМО, обусловленными конструктивными особенностями и экранирующим действием используемых материалов, при проведении дальнейших исследований необходимо применять более чувствительные методики измерения дозовых параметров. Это позволит повысить точность оценки радиационной обстановки и достоверность получаемых данных.

Высокие уровни МАЭД гамма-излучения регистрировались при проведении потенциально радиационно-опасных работ, обеспечивающих хранение первого контура и его дренирование, демонтаж исполнительных механизмов аварийной защиты и приводов компенсирующих групп. На технической площадке в зоне строгого режима они достигали

4,91 мкЗв/ч, в реакторном отсеке – 6,0 мкЗв/ч, при выполнении работ, связанных с хранением паропроизводящей установки с загруженными активными зонами реакторов в носовой и кормовой аппаратной выгородке и на технической площадке в зоне строгого режима, – 7,15 мкЗв/ч.

Анализ среднегодовых индивидуальных доз внешнего облучения персонала различных специальностей при выполнении работ, включая деятельность в ЗСР, показал, что они существенно различаются в зависимости от профессиональных обязанностей, характера и объема работ. Наибольшие среднегодовые индивидуальные эффективные дозы внешнего облучения за последовательные пять лет были зарегистрированы у дефектоскопистов рентгено-, гамма-графирования (6,89 мЗв/год).

Расчет максимально возможных годовых индивидуальных доз внешнего облучения специалистов отдельных профессиональных групп – «слесарь-монтажник» и «дефектоскопист», при полной производственной нагрузке, показал, что гипотетически существует риск превышения установленных пределов доз облучения, в том числе на хрусталик, что следует учитывать при дальнейшем совершенствовании мер по обеспечению радиационной безопасности и охране здоровья работников.

Таким образом, результаты исследования указывают, что на предприятии судоремонта выполняются мероприятия, обеспечивающие радиационную безопасность персонала. Для ее дальнейшего совершенствования, в том числе при повышенной производственной нагрузке, необходим дифференцированный подход к планированию работ по ремонту АМО с учетом специальности персонала, вида, характера, объема и условий выполнения радиационно-опасных работ, а также строгое соблюдение регламентов радиационной безопасности.

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

Кожухова Н.А. – координация работы участников исследования, организация экспедиционных работ, сбор и систематизация данных, обработка полученных результатов, написание и редактирование текста статьи.

Балтрукова Т.Б. – научное редактирование текста, проверка критически важного интеллектуального содержания, утверждение окончательного варианта рукописи.

Арефьева Д.В. – обработка и систематизация первичных материалов исследования, поиск литературных данных, написание и редактирование текста статьи.

#### 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 25.12.2024 № 388-00094-25-00.

#### Литература

1. Арефьева Д.В., Кожухова Н.А. Исследование факторов, влияющих на формирование радиационной обстановки при выполнении работ по ремонту атомных подводных лодок / Матер. 4-го Междунар. молодёжн. форума «Профессия и здоровье». Светлогорск, 05–07 июля 2022 года. Светлогорск: НКО АМТ, ФГБНУ «НИИ МТ», 2022. С. 11–15. DOI 10.31089/978-5-6042929-6-9-2022-1-11-15.
2. Шандала Н.К., Самойлов А.С., Серегин В.А. и др. Роль радиационной гигиены в обеспечении радиационной защиты и безопасности населения и персонала на примере деятельности ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70, № 3. С. 34–47. – DOI 10.33266/1024-6177-2025-70-3-34-47.
3. Саркисов А.А., Гусев Л.Б., Калинин Р.И. Инженерные технологии теории и эксплуатации силовых ядерных реакторов. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 549 с.
4. Шепелин О.П. Гигиена труда в судоремонтной промышленности. М.: Медицина, 1979. 160 с.
5. Антонова К.П., Дынник В.И. Гигиена труда в судостроении. Киев: Здоров'я, 1987. 52 с.
6. Грабский Ю.В., Крупкин А.Б., Кожухова Н.А. и др. Гигиеническая характеристика производственной среды и анализ состояния здоровья персонала предприятия, осуществляющего ремонт атомных подводных лодок / Радиационная гигиена: итоги и перспективы: сб. науч. тр. СПб.: СЗГМУ им. И.И. Мечникова, 2022. С. 38–41.
7. Арефьева Д.В., Джикия Ю.В., Петушок А.В. Дозовые нагрузки на дефектоскопистов гаммаграфирования на предприятии по ремонту атомных подводных лодок / Ильинские чтения 2022: сб. матер. школы-конференции молодых учёных и специалистов. М., 2022. С. 25–27.
8. Балтрукова Т.Б., Арефьева Д.В., Шаяхметова А.А. и др. Оценка доз облучения персонала при проведении радионуклидной дефектоскопии на предприятии атомного судоремонта // Medline.ru. Российский биомедицинский журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 260–269.
9. Шлеенкова Е.Н., Голиков В.Ю., Кайдановский Г.Н. и др. Результаты контроля доз облучения хрусталиков глаз у медицинского персонала г. Санкт-Петербурга // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 29–36.
10. Кайдановский Г.Н., Шлеенкова Е.Н., Бажин С.Ю. и др. Инструментальное исследование доз облучения и условий работы персонала рентгенохирургических бригад // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 148–157.
11. Кайдановский Г.Н., Шлеенкова Е.Н. О проблемах контроля доз облучения хрусталика глаза // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 75–80.

Поступила: 21.10.2025

**Кожухова Наталья Александровна** – исполняющая обязанности заведующего лабораторией № 2 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: lab2niipmm@yandex.ru  
 ORCID: 0000-0002-6223-0173

**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

**Арефьева Дарья Владимировна** – исполняющая обязанности заведующего лабораторией № 1 Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0002-3879-8594

**Для цитирования:** Кожухова Н.А., Балтрукова Т.Б., Арефьева Д.В. Особенности облучения персонала при выполнении работ по ремонту атомных морских объектов // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 34–43. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-34-43

## The specifics of personnel exposure during the repair of nuclear maritime facilities

Natalya A. Kozhukhova, Tatyana B. Baltrukova, Darya V. Arefyeva

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

*The development strategy for Russia's shipbuilding industry anticipates a multi-fold increase in the capacity of ship repair enterprises servicing nuclear maritime facilities, which underscores the need to enhance radiation safety for personnel. The aim of the study was to determine the conditions and levels of occupational radiation exposure at the workplaces of various personnel categories at a nuclear ship repair enterprise, including under increased production loads. Materials and methods: The study was conducted at a major nuclear ship repair facility. The ambient dose equivalent rate of gamma radiation and beta contamination levels were measured at workplaces of main, auxiliary, and administrative personnel (Group A). Data from the plant's radiation monitoring and five-year statistical reports on individual doses (Form No. 1-DOZ, 2016–2020) were analyzed. Individual thermoluminescent dosimeters were used to estimate potential maximum doses. Results and discussion: During periods when no radiation-hazardous work was being performed, the ambient dose equivalent rate at most workplaces did not exceed background levels (0,16 μSv/h), except near a tank with liquid radioactive waste (up to 6,75 μSv/h). During potentially hazardous operations (primary circuit maintenance, dismantling of safety mechanisms), the ambient dose equivalent rate reached 4,91–7,15 μSv/h. The highest five-year average individual effective doses were recorded for flaw detection inspectors (6,89 mSv/year). Calculations for a hypothetical scenario of full workload revealed a potential risk of exceeding dose limits for certain occupations (fitter-installer, flaw detection inspector), especially for the lens of the eye. Conclusion: Radiation exposure conditions for personnel vary significantly depending on profession and type of work. To ensure radiation safety, a differentiated approach to planning repair work is required, taking into account personnel specialty, the nature of operations, and strict adherence to safety protocols, especially during high-load periods and for high-risk groups.*

**Key words:** personnel, ionizing radiation exposure, nuclear ship repair enterprises, nuclear maritime facilities, radiation safety, radiation dose.

### Authors' personal contribution

Kozhukhova N.A. – coordination of the research participants, organization of expedition work, collection and systematization of data, processing of the obtained results, writing and editing of the article text.

Baltrukova T.B. – scientific editing of the text, verification of critically important intellectual content, approval of the final version of the manuscript.

Arefyeva D.V. – processing and systematization of the primary research materials, search for literary data, writing and editing of the article text.

### 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. 388-00094-25-00 dated 12/25/2024.

### References

1. Arefyeva DV, Kozhukhova NA. Investigation of factors influencing the formation of radiation environment during repair work on nuclear submarines // Proceedings of the 4th International Youth Forum "PROFESSION and HEALTH". Svetlogorsk: NPO AMT, FGBNU "Research Institute of Medical Technologies"; 2022. P. 11-15. DOI 10.31089/978-5-6042929-6-9-2022-1-11-15. (In Russian).
2. Shandala NK, Samoilov AS, Seregin VA, Kiselev SM, Kvacheva YuE, Metlyayev EG, et al. The role of radiation hygiene in ensuring radiation protection and safety of the population and personnel based on the example of the

**Natalya A. Kozhukhova**

Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine

**Address for correspondence:** 65, Yuri Gagarin Avenue, Saint Petersburg, 196143, Russia; E-mail: lab2niipmm@yandex.ru

- activities of the FSBI SSC FMBC named after A.I. Burnazyan FMBA of Russia. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2025;70(3): 34–47. DOI 10.33266/1024-6177-2025-70-3-34-47. (In Russian).
3. Sarkisov AA, Gusev LB, Kalinin RI. Engineering technologies of theory and operation of power nuclear reactors. Moscow: Publishing House of MEI; 2011. 549 p. (In Russian).
  4. Shepelin OP. Occupational health in ship repair industry. Moscow: Meditsina; 1979. 160 p. (In Russian).
  5. Antonova KP, Dynnik VI. Occupational health in shipbuilding. Kiev: Zdorov'ya; 1987. 52 p. (In Russian).
  6. Grabsky YuV, Krupkin AB, Kozhukhova NA, Trofimchuk SN, Arefyeva DV, Morozov DYu. Hygienic characteristics of the working environment and analysis of the health status of personnel at an enterprise repairing nuclear submarines // *Radiation Hygiene: Results and Prospects: Collection of Scientific Papers*. Saint Petersburg: N.W. State Medical University named after I.I. Mechnikov, 2022. P. 38-41. (In Russian).
  7. Arefyeva DV, Dzhikiya YuV, Petushok AV. Dose loads on gamma radiographers at a nuclear submarine repair enterprise. Ilyinsky Readings 2022: Collection of Materials of the School-Conference of Young Scientists and Specialists. Moscow; 2022. P. 25-27. (In Russian).
  8. Baltrukova TB, Arefyeva DV, Shayakhmetova AA, et al. Assessment of personnel radiation doses during radionuclide flaw detection at a nuclear ship repair enterprise // *Medline.Ru. Rossiyskiy Biomeditsinskiy Zhurnal = Medline.Ru. Russian Biomedical Journal*. 2023. T. 24, № 1. C. 260-269. (In Russian).
  9. Shleenkova EN, Golikov VYu, Kaidanovsky GN, Dzhikiya YuV, Petushok AV. Results of Lens Dose Monitoring Among Medical Personnel in St. Petersburg // *Radiatsionnaya Gigiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 29–36. (In Russian).
  10. Kaidanovsky GN, Shleenkova EN, Bazhin SYu, Ilyin VA, Tarita VA, Firsanov VB. Instrumental Study of Radiation Doses and Working Conditions of X-ray Surgery Team Personnel. *Radiatsionnaya Gigiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 148–157. (In Russian).
  11. Kaidanovsky GN, Shleenkova EN. On the Problems of Lens Dose Monitoring // *Radiatsionnaya Gigiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(3): 75–80. (In Russian).

Received: October 21, 2025

**For correspondence: Natalya A. Kozhukhova** – Acting Head of Laboratory No. 1, Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine of the Federal Medical and Biological Agency (65, Yuri Gagarin Avenue, Saint Petersburg, 196143, Russia; E-mail: lab2niipmm@yandex.ru)

ORCID: 0000-0002-6223-0173

**Tatyana B. Baltrukova** – Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher at Laboratory No. 2, Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine of the Federal Medical and Biological Agency, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-8726-7044

**Darya V. Arefieva** – Acting Head of Laboratory No. 1, Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine» of the Federal Medical and Biological Agency, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-3879-8594

**For citation: Kozhukhova N.A., Baltrukova T.B., Arefyeva D.V. The specifics of personnel exposure during the repair of nuclear maritime facilities. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 34–43. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-34-43**

## Эффективные дозы облучения пациентов при компьютерной томографии сочетанных областей тела по данным фантомной дозиметрии

Маткевич Е.И., Ганцовский П.П., Сивенков А.Г., Комаров А.Ю., Юрина И.Л., Цовьянов А.Г., Башков А.Н.

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

Целью исследования являлось выполнение фантомной дозиметрии органов и тканей для оценки эффективных доз облучения пациентов при компьютерной томографии сочетанных областей тела и сравнение их с дозами, рассчитанными по показателям на консоли сканера. Методика. Исследование выполнено на 64-срезовом компьютерном сканере Toshiba Aquilion 64 с использованием антропоморфного тканезквивалентного фантома с параметрами взрослого пациента массой 73,5 кг и термолуминесцентных дозиметров с детекторами с ДТГ-4 на основе кристаллического LiF. Детекторы размещали в местах расположения органов и тканей при стандартных протоколах компьютерной томографии двух сочетанных областей тела: 1) органы грудной клетки, брюшной полости и малого таза; 2) органы брюшной полости и малого таза. При вычислении эффективной дозы облучения использовали взвешивающие коэффициенты ткани по НРБ-99/2009 и по Публикации 103 МКРЗ. Результаты исследования и обсуждение: Наибольший вклад в эффективную дозу облучения выявлен для гонад, красного костного мозга, толстого кишечника, лёгких и желудка (в сумме 71,8 – 76,2 %). Установлено, что эффективные дозы облучения пациентов, рассчитанные по результатам фантомной дозиметрии, больше значений полученным по данным DLP на консоли компьютерного сканера при использовании взвешивающих коэффициентов ткани по Публикации 103 МКРЗ для области 1 в 1,12, для области 2 – в 1,13 раза, по НРБ-99/2009, соответственно, – в 1,30 и в 1,38 раза. Заключение: При компьютерной томографии дозиметрия на антропоморфном тканезквивалентном фантоме термолуминесцентными дозиметрами демонстрирует несколько более высокие дозы облучения по сравнению со значениями доз, рассчитанных по DLP на консоли. Это свидетельствует о важности периодического сопоставления доз облучения пациентов, рассчитанных по DLP на консоли томографа, с дозами, зарегистрированными в ходе прямой дозиметрии при реальных условиях компьютерной томографии в отделениях и центрах лучевой диагностики.

**Ключевые слова:** компьютерная томография, отделения и центры лучевой диагностики, радиационная безопасность, фантомная дозиметрия, термолуминесцентные детекторы, эффективная доза.

### Введение

Контроль за дозами облучения пациентов при компьютерной томографии (КТ) очень важен [1–3], так как в последние годы в России и в зарубежных странах значительно увеличивается количество КТ-исследований, в том числе у одного и того же пациента [4]. Каждое такое исследование сопровождается значительными дозами облучения, особенно

при КТ сочетанных областей тела, что приводит к увеличению популяционной дозы и рисков отдаленных последствий у пациентов. Необходимость постоянного контроля за соответствием доз облучения при рентгенологических процедурах референтным диагностическим уровням (РДУ), в том числе при КТ, определена в методических документах<sup>1-3</sup>.

В последние годы в научной литературе и при разработке РДУ для КТ в зарубежной практике лучевой диагно-

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

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

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

**Маткевич Елена Ивановна**

Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна

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

стики всё шире применяются различные методы оценки дозовой нагрузки: модельные расчёты на основе математических и воксельных фантомов, исследования с использованием физических антропоморфных фантомов, в том числе с применением термолюминесцентных детекторов, а также расчёты методом Монте-Карло [5–10]. Однако в рутинной практике КТ-диагностики в России эти методы не применяются. Врачи-рентгенологи для учета доз облучения при КТ любой анатомической области и их сочетаний используют показания на консоли КТ-сканера, в частности величину DLP (dose-length product – произведение дозы на длину сканирования). В доступной литературе крайне редко встречаются публикации о сравнении эффективной дозы облучения пациентов, рассчитанной с помощью значений DLP на консоли КТ-сканера, с дозами облучения, непосредственно зарегистрированными детекторами при фантомной дозиметрии.

Как показано в исследовании [11], основной вклад в суммарную дозу облучения персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения и проходившего диагностические КТ в 2020–2024 гг., вносили дозы от КТ-исследований. Средняя доза облучения при КТ в зависимости от области сканирования варьировала от 2,22 до 34,33 мЗв, что значительно превышает профессиональные дозы облучения этих лиц в производственных условиях (0,35 – 2,41 мЗв). При этом у направляемых на КТ-исследования работников преобладала (76 – 85 %) доля сочетанной области сканирования (органы грудной клетки, брюшной полости забрюшинного пространства и малого таза). При КТ-сканировании этой области средняя доза составляла от 10,54 до 34,33 мЗв.

Периодическая оценка эффективной дозы на основе суммы доз облучения органов и тканей важна для корректности учета доз облучения всех пациентов и, особенно, пациентов из числа персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения, что определяет актуальность проведенного исследования.

**Цель исследования** – выполнить фантомную дозиметрию органов и тканей для оценки эффективных доз облучения пациентов при КТ сочетанных областей тела (органы грудной клетки, брюшной полости и забрюшинного пространства, малого таза).

### Задачи исследования

1. Оценить дозы облучения в радиочувствительных органах и тканях при КТ выбранных сочетанных областей на тканезквивалентном фантоме с использованием термолюминесцентных детекторов и установить органы и ткани с наибольшим вкладом в дозу облучения пациента.

2. При КТ выбранных сочетанных областей сканирования сравнить эффективную дозу облучения по результатам измерений на тканезквивалентном фантоме и рассчитанную по значениям DLP на консоли КТ-сканера.

3. Вычислить дозовые коэффициенты ( $e^i_{DLP}$ , мЗв/(мГр×см)) для КТ выбранных сочетанных областей на сканере Toshiba Aquilion 64 при использовании взвешивающих коэффициентов тканей по НРБ-99/2009 и по Публикации 103 МКРЗ (ICRP-103) и сравнить их с дозовыми коэффициентами из методических указаний МУ 2.6.1.2944-11.

### Материалы и методы

*Параметры гетерогенного антропоморфного фантома RANDO (ART Phantom, Alderson Radiation Therapy, Radiology Support Devices, CLLIA)*

Используемый фантом (рис. 1) моделирует взрослого мужчину ростом 175 см и массой 73,5 кг. Фантом выполнен из тканезквивалентных материалов, имитирующих плотность и рентгеновские характеристики мягких тканей, костей и лёгких, с учетом стандартов ICRU-44 [12] (International Commission on Radiation Units and Measurements – Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям). Фантом [11] состоит из 35 горизонтальных слоёв, каждый слой толщиной 2,5 см содержит отверстия и гнёзда для установки детекторов.

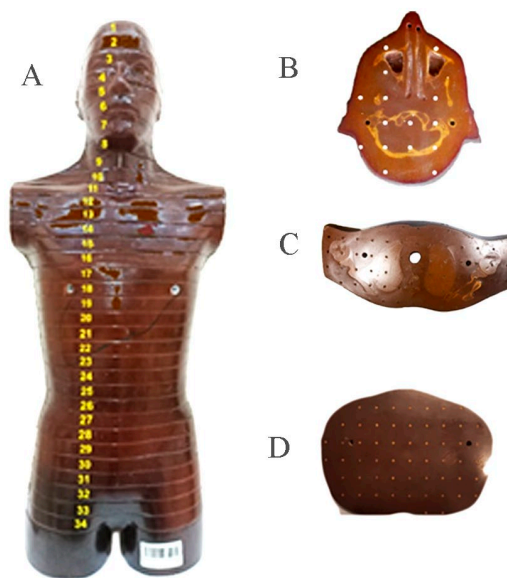


Рис. 1. Гетерогенный-антропоморфный фантом мужского типа. А – фантом в собранном виде; слои фантома на уровнях: В – голова, С – верхняя треть легких, D – уровень малого таза

[Fig. 1. Heterogeneous anthropomorphic male-type phantom. A – assembled phantom; B – head level; C – upper third of the lungs; D – pelvic level]

### Термолюминесцентные дозиметры и их калибровка

В гнёзда слоев фантома устанавливались детекторы ДТГ-4 на основе кристаллического фтористого лития (LiF), активированного Mg, Ti [13]. Они предназначены для регистрации индивидуального эквивалента дозы фотонного (рентгеновского и гамма-) излучения, в том числе в органах и тканях, в диапазоне от 20 мкЗв до 10 Зв при энергии излучения от 15 до 18000 кэВ и являются основной составной частью термолюминесцентных дозиметров (ТЛД) DTU-1. Для измерений использовали 95 детекторов, которые были равномерно распределены по 5 анатомическим областям: голова, шея, органы грудной клетки (ОГК), органы брюшной полости и забрюшинного пространства (ОБП и ЗП), органы малого таза (ОМТ). В парных органах детекторы устанавливали в правой и левой половинах фантома в равных количествах.

Дозиметрические измерения проводились на термолюминесцентном комплексе «ДВГ-02ТМ» (рис. 2) [13], который проходит регулярные поверки с оценкой метрологических характеристик.

Калибровка детекторов производилась на эталонных установках ООО НПО «Спектр» в поле изотопного источника гамма-излучения <sup>137</sup>Cs с учетом рассеяния излучения от водного фантома, погрешность оценки коэффициента калибровки составляла 10 % (P=95 %). Для определения поправочного коэффициента, учитывающего энергетическую зависимость и отличие чувствительности ТЛД детекторов в поле изотопного источника <sup>137</sup>Cs (с энергией 661,7 кэВ) по сравнению с рентгеновским излучением КТ-сканера Toshiba Aquilion 64 при напряжении на трубке 120 кВ (средняя энергия 60-80 кэВ), было проведено четыре сеанса облучения прямоугольного водного фантома в поле КТ-сканера Toshiba Aquilion 64: два сеанса облуче-

ния при КТ-сканировании с ТЛД детекторами и два сеанса с использованием универсального дозиметра ДКС-101 с ионизационной камерой БМК-06 [14] (бесконтактная многофункциональная камера с рабочим объемом 0,6 см<sup>3</sup>).<sup>3,4</sup> При этих четырех сеансах параметры КТ-протоколов были идентичны последующим экспериментальным КТ-сканированиям на тканеэквивалентном фантоме. Общий бюджет неопределенности результата оценки поглощенной дозы не превышал 10 %.

*Расположение детекторов в слоях фантома*

Детекторы были размещены в тканеэквивалентном антропоморфном фантоме (табл. 1, рис. 2) в зонах расположения органов и тканей человека, перечисленных в рекомендациях НРБ-99/2009<sup>5</sup> и ICRP-103 [15]. Их размещение внутри фантома позволяло учитывать реальные условия КТ-сканирования, включая рассеянное излучение в тканях.

Таблица 1. Размещение ТЛД детекторов и взвешивающие коэффициенты тканей для расчета дозы облучения органов и тканей [Table 1. Placement of TLD detectors and tissue weighting factors for calculating the dose to organs and tissues]

№	Орган / ткань [Organs / tissues]	Номера слоёв фантома [Phantom slice numbers]	Количество детекторов [Number of detectors]	Взвешивающий коэффициент ткани [Tissue weighting factor]	
				НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]	ICRP-103
1	Гонады (яичники и семенники) [Gonads (ovaries and testes)]	26–29, 34	6	0,2	0,08
2	Красный костный мозг [Red bone marrow]	14–16, 28–30	7 <sup>a)</sup>	0,12	0,12
3	Толстый кишечник [Colon (large intestine)]	21–26	9	0,12	0,12
4	Легкое [Lung]	11–18	11	0,12	0,12
5	Желудок [Stomach]	19–20	6	0,12	0,12
6	Мочевой пузырь [Urinary bladder]	28–30	3	0,05	0,04
7	Печень [Liver]	19–23	3	0,05	0,04
8	Пищевод [Esophagus]	12–16	3	0,05	0,04
9	Щитовидная железа [Thyroid gland]	8–9	4	0,05	0,04
10	Кожа груди, живота и таза [Skin of the chest, abdomen, and pelvis]	12–34	24 <sup>b)</sup>	0,01	0,01
11	Клетки костной поверхности [Bone surface cells]	14–16, 28–30	7 <sup>a)</sup>	0,01	0,01
12	Остальное [Remainder tissues] <sup>c)</sup>	1–5, 16–18, 31–33	19	0,05	0,12
13	Всего [Total]	1–35	95 / 102 <sup>d)</sup>	1,0	1,0

<sup>a)</sup> Для расчетов использованы показания трех детекторов из области ОГК и четырех из области ОБП и ОМТ [The readings from 3 detectors in the thoracic region and 4 detectors in the abdominal and pelvic region were used for calculations].

<sup>b)</sup> Для расчетов использованы показания восьми детекторов из области ОГК и 16 детекторов из области ОБП и ОМТ [The readings from 8 detectors in the thoracic region and 16 detectors in the abdominal and pelvic region were used for calculations].

<sup>c)</sup> В «Остальное» входили согласно ICRP-103 - надпочечники, экстраторакальный отдел органов дыхания, желчный пузырь, сердце, почки, лимфоузлы, мышцы, слизистая рта, поджелудочная железа, простата, тонкий кишечник, селезенка, тимус, матка/шейка матки; согласно НРБ-99/2009 – надпочечники, головной мозг, экстраторакальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечную ткань, поджелудочную железу, селезенка, тимус и матка [According to ICRP Publication 103, the remainder tissues included the adrenal glands, extrathoracic airways, gallbladder, heart, kidneys, lymph nodes, muscle, oral mucosa, pancreas, prostate, small intestine, spleen, thymus, and uterus/cervix. According to NRB-99/2009, the remainder tissues included the adrenal glands, brain, extrathoracic airways, small intestine, kidneys, muscle tissue, pancreas, spleen, thymus, and uterus].

<sup>d)</sup> Количество детекторов, с учетом того, что их показания были использованы дважды для оценки дозы разных тканей [Number of detectors, taking into account those used twice to assess the dose of different tissues].

<sup>4</sup>ГОСТ 27451-87 Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия. М, 1987 (редакция 1994). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200015371> (Дата обращения: 17.03.2026) [GOST 27451-87 Ionizing radiation measuring means. General specifications. Moscow, 1987 (1994 edition). <https://docs.cntd.ru/document/1200015371> (Accessed: 17.03.2026). (In Russ.)]

<sup>5</sup>СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Роспотребнадзор, 2009. 225 с. [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2523-09. Radiation safety standards (NRB-99/2009). Moscow: Rosпотребнадзор; 2009. 225 p. (In Russ.)]

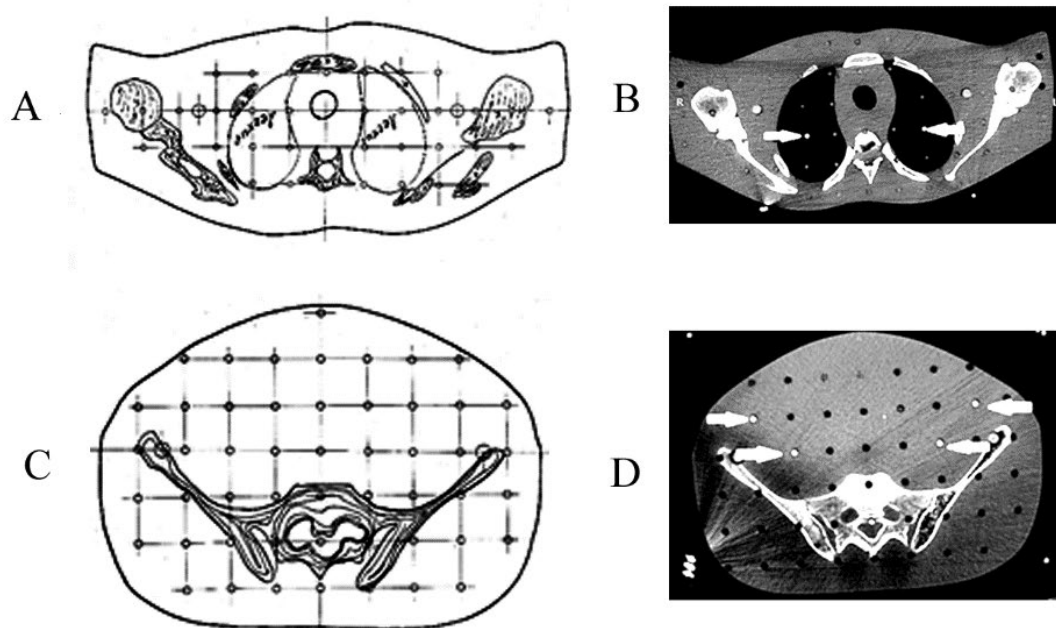


Рис. 2. Пример расположения детекторов в слоях и на КТ изображениях фантома: А – схема 11-го слоя фантома (верхушка лёгких), В – КТ-изображение на уровне 11-го слоя фантома (стрелками указаны детекторы), С – схема 27-го слоя фантома (на уровне седалищных костей), D – КТ- изображение на уровне 27-го слоя фантома (стрелками указаны детекторы в проекции гонад (яичников))

[Fig. 2. Example of detectors placement in the phantom: А – diagram of slice 11 (lung apex level); В – CT image at slice 11 (arrows indicate the detectors in the projection of the gonads); С – diagram of slice 27 (ischial bone level); D – CT image at slice 27 (arrows indicate the detectors in the projection of the gonads)]

Параметры облучения и оценка доз

Количество светового излучения (светосумма), испущенного термомлюминесцентным детектором при нагревании детекторов в процессе считывания показаний, прямо пропорционально значению поглощенной дозы ионизирующего излучения. После каждого КТ-исследования ТЛД-детекторы извлекали из фантома и на комплексе «ДВГ-02ТМ» измеряли этот показатель для каждого детектора. Затем его переводили в поглощенную дозу (мГр) и по ней рассчитывали эквивалентную дозу (взвешивающий коэффициент рентгеновского излучения  $W_R = 1,0$ ). В последующем были определены эффективные дозы ( $D_{eff}$ ) как суммы вклада доз органов и тканей, вычисленных с использованием взвешивающих коэффициентов ткани ( $W_T$ ) в соответствии с НРБ-99/2009 или с рекомендациями ICRP-103 (табл. 1).

Всего было проведено 2 экспериментальных КТ-сканирования (рис. 3А, рис. 3В) сочетанных областей тканеэквивалентного фантома.

Первое экспериментальное КТ-сканирование (КТ-1) было проведено от уровня нижнего края щитовидного хряща до седалищных бугров и включало анатомические области ОГК, ОБП и ЗП, ОМТ (рис. 3С). Второе экспериментальное КТ-сканирование (КТ-2) было проведено от уровня верхнего края реберной дуги до седалищных бугров и включало те же органы, что и при КТ-1, за исключением ОГК (рис. 3D).

Оба экспериментальных исследования были выполнены на 64 срезовом КТ-сканере Toshiba Aquilion 64 с использова-

нием параметров КТ, которые применяются в типичной клинической практике учреждения (табл. 2). Использовалась автоматическая настройка силы тока (мА) рентгеновской трубки, которая зависит от толщины и плотности тканей области сканирования.

Таблица 2. Характеристика КТ-сканера и параметры использованных протоколов

[Table 2. Characteristics of the CT-scanner and parameters of the protocols used]

Параметры [Parameters]	КТ-сканер [CT-scanner] Toshiba Aquilion 64
Количество рядов детекторов [Number of detector rows]	64
Год установки [Year of installation]	2008
Питч [Pitch]	0,5
Время ротации трубки, с [Tube rotation time, s]	0,5
Напряжение, кВ [Voltage, kV]	120
Толщина среза, мм [Slice thickness, mm]	1
Сила тока на трубке, мАс [Amperage on the tube, mAs]	Automatic Exposure Control system (AEC) SUREExposure 3D

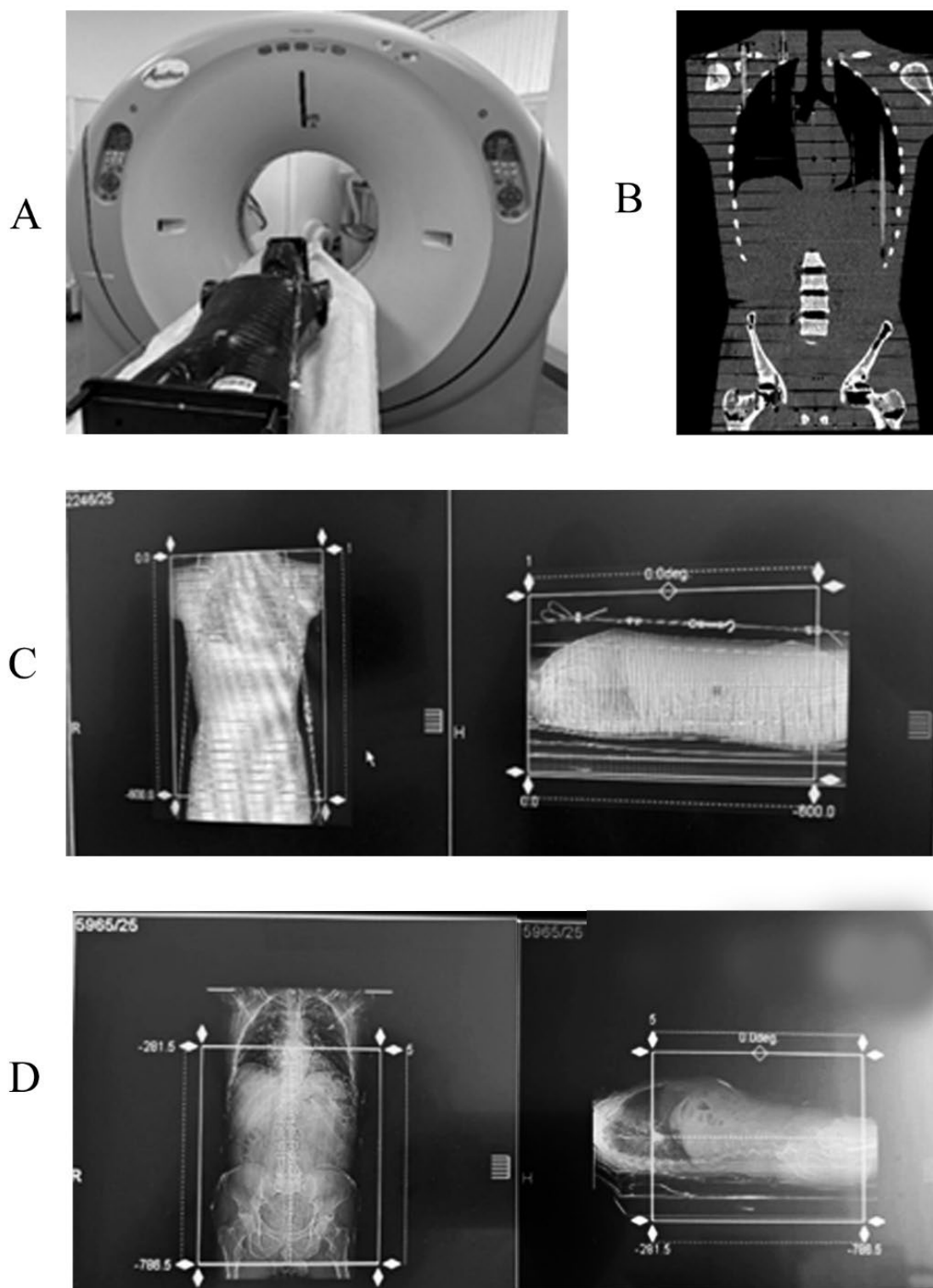


Рис. 3. Методика выполнения КТ-1 и КТ-2: размещение фантома на столе КТ-сканера непосредственно перед началом процедуры (А), коронарная проекция облученного фантома (В), примеры сканограмм фронтальной и сагиттальной проекций зон облучения при КТ-1 (С) и при КТ-2 (D)

[Fig. 3. CT-1 and CT-2 scanning protocols: A – positioning of the phantom on the CT scanner table immediately before the procedure, B – coronal projection of irradiated phantom, C – frontal and sagittal scout views showing the irradiation area for CT-1, D – corresponding scout views for CT-2]

При фантомной дозиметрии вычисляли среднюю поглощённую дозу излучения (мГр) в органах и тканях и стандартную ошибку среднего арифметического ( $M \pm m$ ). Затем по этим значениям рассчитывали эквивалентные дозы (мЗв) для каждого органа (ткани). Эффективные дозы (мЗв) облучения пациентов при КТ-1 и КТ-2 определяли путём суммирования вклада доз облучения органов и тканей, указанных в таблице 1.

При регистрации дозовой нагрузки на фантом по параметрам, выводимым при завершении каждого исследования на консоль КТ-сканера, использовали значения CTDIvol (мГр) (Computed Tomography Dose Index, компьютерно-томографический объёмный взвешенный индекс дозы) и DLP (мГр×см) (Dose Length Product, произведение дозы на длину сканирования) (рис. 4А, рис. 4В).

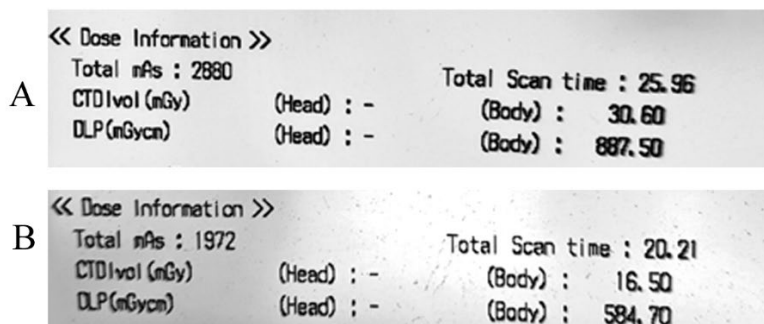


Рис. 4. Отчеты о значениях CTDIvol и DLP на консоли КТ-сканера при КТ-1 (А) и КТ-2 (В)  
 [Fig. 4. CT scanner console report showing CTDIvol and DLP values for CT-1 (A) and CT-2 (B)]

Эффективную дозу облучения пациента ( $D_{eff}$ ) вычисляли по формуле:

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

где  $e^i_{DLP}$  – дозовый коэффициент для  $i$ -й анатомической области, мЗв/(мГр×см). В соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.2944-11 (в редакции МУ 2.6.1.3584-19): для КТ-1  $e^i_{DLP} = 0,014$  мЗв/(мГр×см), для КТ-2  $e^i_{DLP} = 0,015$  мЗв/(мГр×см).

В последующем эффективные дозы облучения, рассчитанные на основании проведенной фантомной дозиметрии, сопоставляли с эффективными дозами, рассчитанными по DLP на консоли КТ-сканера.

Статистическую обработку данных проводили в электронных таблицах MS Excel ver. 16.

### Результаты и обсуждение

По результатам измерений (табл. 3) к органам и тканям с наибольшим вкладом в эффективную дозу облучения можно отнести гонады, красный костный мозг, толстый кишечник, лёгкое, желудок, дозы облучения которых составляли от общей дозы при КТ-1 75,9 % при оценке по НРБ 99/2009 и 72,1 % при оценке по ICRP-103; при КТ-2 составляли, соответственно, 76,2 % и 71,8 %. На вторую по величинам доз облучения группу (мочевой пузырь, печень и пищевод) от общей дозы облучения при КТ-1 приходилось 16,5 % при оценке по НРБ 99/2009 и 15,0 % при оценке по ICRP-103; при КТ-2 приходилось, соответственно, 19,9 % и 19,4 %. На третью группу (кожа груди, живота и таза, клетки костной поверхности и «остальное») от общей дозы облучения при КТ-1 приходилось 5,6 % при оценке по НРБ 99/2009 и 11,1 % при оценке по ICRP-103; при КТ-2 приходилось, соответственно, 3,8 % и 8,7 %.

Таблица 3. Оценка эквивалентных доз и вклада органов и тканей в эффективную дозу по результатам фантомной дозиметрии при экспериментальных исследованиях КТ-1 и КТ-2

[Table 3. Estimation of equivalent doses and the contribution of organs and tissues to the effective dose based on the results of phantom dosimetry in experimental studies of CT-1 and CT-2]

№	Органы/ткани [Organs/tissues]	Эквивалентная доза ( $M \pm m$ ), мЗв [Equivalent dose ( $M \pm m$ ), mSv]		Дозы облучения органов и тканей ( $M \pm m$ ), мЗв (с расчетами по взвешивающим коэффициентам ткани) [Dose organs and tissues ( $M \pm m$ ), mSv (calculated using tissue weighting factors)]			
		КТ-1 [CT-1]	КТ-2 [CT-2]	НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]		ICRP-103	
				КТ-1 [CT-1]	КТ-2 [CT-2]	КТ-1 [CT-1]	КТ-2 [CT-2]
1	Гонады (яичники и семенники) [Gonads (ovaries and testes)]	18 ± 3,5	17,6 ± 1,4	3,6 ± 0,7	3,5 ± 0,3	1,44 ± 0,3	1,41 ± 0,08
2	Красный костный мозг [Red bone marrow]	20,7 ± 1,4	9,0 ± 1,6	2,5 ± 0,2	1,1 ± 0,16	2,5 ± 0,16	1,1 ± 0,2

№	Органы/ткани [Organs/tissues]	Эквивалентная доза (M ± m), мЗв [Equivalent dose (M ± m), mSv]		Дозы облучения органов и тканей (M ± m), мЗв (с расчетами по взвешивающим коэффициентам ткани) [Dose organs and tissues (M ± m), mSv (calculated using tissue weighting factors)]			
		КТ-1 [CT-1]	КТ-2 [CT-2]	НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]		ICRP-103	
				КТ-1 [CT-1]	КТ-2 [CT-2]	КТ-1 [CT-1]	КТ-2 [CT-2]
3	Толстый кишечник [Colon]	16,6 ± 0,4	15,8 ± 0,9	2,0 ± 0,08	1,9 ± 0,1	1,99 ± 0,08	1,89 ± 0,1
4	Легкое [Lung]	15,8 ± 1,7	5,6 ± 1,2	1,9 ± 0,16	0,7 ± 0,2	1,89 ± 0,16	0,67 ± 0,2
5	Желудок [Stomach]	17,8 ± 0,6	17,0 ± 0,6	2,1 ± 0,08	2,0 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,0 ± 0,1
6	Мочевой пузырь [Urinary bladder]	19,8 ± 1,3	17,3 ± 0,5	0,99 ± 0,08	0,87 ± 0,02	0,8 ± 0,08	0,7 ± 0,02
7	Печень [Liver]	19,8 ± 0,6	16,4 ± 0,9	0,99 ± 0,03	0,82 ± 0,08	0,8 ± 0,03	0,7 ± 0,04
8	Пищевод [Esophagus]	15,4 ± 1,8	14,3 ± 31	0,8 ± 0,1	0,7 ± 0,3	0,62 ± 0,19	0,57 ± 0,36
9	Щитовидная железа [Thyroid gland]	5,8 ± 1,0	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,08	0,02 ± 0,02	0,23 ± 0,1	0,01 ± 0,01
10	Кожа груди, живота и таза [Skin of the chest, abdomen, and pelvis]	18,7 ± 1,7	14,4 ± 1,4	0,19 ± 0,02	0,14 ± 0,01	0,19 ± 0,02	0,14 ± 0,01
11	Клетки костной поверхности [Bone surface cells]	20,7 ± 1,4	8,9 ± 1,6	0,21 ± 0,03	0,09 ± 0,02	0,21 ± 0,03	0,09 ± 0,01
12	Остальное [Remainder tissues]	9,3 ± 3,2	5,4 ± 1,8	0,5 ± 0,2	0,3 ± 0,1	1,1 ± 0,4	0,7 ± 0,2
13	Всего [Total]	198,4	142,1	16,08	12,14	13,87	9,98

Сравнение доз облучения органов и тканей между двумя экспериментальными КТ-исследованиями (табл. 3) показало снижение вклада облучения красного костного мозга и лёгких в  $D_{\text{эфф}}$  облучения пациента при КТ-2 по сравнению с КТ-1: доза облучения уменьшилась в красном костном мозге с  $20,7 \pm 1,4$  мЗв до  $9,0 \pm 1,6$  мЗв, в лёгких – с  $15,8 \pm 1,7$  мЗв до  $5,6 \pm 1,2$  мЗв. Для остальных органов и тканей (гонады, толстый кишечник, желудок, мочевой пузырь и др.), расположенных в одинаковых для КТ-1 и КТ-2 зонах сканирования, значения доз близки.

Сравнение доз, рассчитанных с учетом различий взвешивающих коэффициентов тканей по НРБ-99/2009 и по рекомендациям ICRP-103 показало, что для гонад доза по НРБ-99/2009 составила 3,5 – 3,6 мЗв, а по ICRP-103 – 1,41 – 1,44 мЗв. Это объясняется тем, что в НРБ-99/2009 взвешивающий коэффициент ткани для гонад существенно выше (0,20), чем в ICRP-103 (0,08). Для других органов и тканей (красного костного мозга, толстого кишечника, лёгких, желудка, кожи и клеток костной поверхности) дозы при КТ-1 и при КТ-2 при расчётах с использованием взвешивающих коэффициентов ткани как по НРБ-99/2009, так и по ICRP-103 совпадают между собой или близки.

Результаты дозиметрических измерений при КТ-1 и КТ-2 показали, что уменьшение протяженности зоны облучения фантома при КТ-2 по сравнению с КТ-1 приводит к статистически значимому снижению эквивалентной дозы облучения для органов, которые не попадали или частично попадали в область сканирования (щитовидная железа, легкие, красный костный мозг, клетки костной поверхности). В то же время, при обоих вариантах КТ для органов, находившихся в пределах сочетанной области облучения (желудок, печень,

мочевой пузырь и толстый кишечник), различия между эквивалентными дозами были не велики (в среднем не более  $\pm 11,2\%$ ) и статистически не значимы.

В повседневной практике врачи-рентгенологи используют значение DLP на консоли КТ-сканера. Данный показатель доступен всем врачам-рентгенологам сразу после каждого КТ-исследования и используется для оценки  $D_{\text{эфф}}$  при КТ любой анатомической области, а также при сопоставлении дозы облучения пациента с референтными диагностическими уровнями согласно МР 2.6.1.0296-22 и [16]. Это делает показатель DLP удобным оперативным инструментом для оптимизации протоколов КТ-сканирований, а также для ретроспективной оценки доз облучения пациентов.

Результаты сравнения значений эффективной дозы при КТ-1 и КТ-2, полученных по результатам фантомной дозиметрии ( $D_{\text{эфф}2}$  и  $D_{\text{эфф}3}$ ), с расчётами на основе значений DLP на консоли КТ-сканера ( $D_{\text{эфф}1}$ ) представлены в таблице 4. При этом следует учесть, что DLP с консоли отражает дозу облучения не отдельных органов и тканей, а всей сканируемой анатомической области. Для расчета  $D_{\text{эфф}1}$  взвешивающие коэффициенты для анатомических областей приведены в ICRP-87 [5] и в МУ 2.6.1.2944-11 (в редакции МУ 2.6.1.3584-19)<sup>2</sup>. При фантомной дозиметрии эффективная доза облучения рассчитывалась как сумма доз облучения органов и тканей с учетом взвешивающих коэффициентов для этих органов и тканей отдельно по коэффициентам из НРБ-99/2009 ( $D_{\text{эфф}2}$ ) и по коэффициентам из ICRP-103 ( $D_{\text{эфф}3}$ ). Эффективные дозы  $D_{\text{эфф}2}$  и  $D_{\text{эфф}3}$  сравнивались с установленной по DLP на консоли КТ-сканера  $D_{\text{эфф}1}$  (рассчитана по коэффициентам из ICRP-87 / МУ 2.6.1.2944-11).

Таблица 4. Сопоставление доз, рассчитанных по значениям DLP на консоли КТ-сканера и по результатам фантомной дозиметрии, при КТ-1 и КТ-2

[Table 4. Dose values on the CT scanner console and obtained from phantom dosimetry data during CT-1 and CT-2]

КТ-исследование [CT scan]	Расчеты $D_{\text{eff}}^{1(a)}$ по данным на консоли КТ –сканера [From console of the CT scanner]			Расчеты $D_{\text{eff}}^{2(b)}$ и $D_{\text{eff}}^{3(c)}$ по результатам фантомной дозиметрии [Based on phantom dosimetry]						$e^{i}_{\text{DLP}}$ по результатам данного исследования, мЗв/(мГр×см) [ $e^{i}_{\text{DLP}}$ based on the research result, mSv/(mGy×cm)]	
	CTDIvol, мГр [CTDIvol, mGy]	DLP, мГр×см [DLP, mGy×cm]	$e^{i}_{\text{DLP}}$ , мЗв/(мГр×см) ICRP-87 / MU 2.6.1.2944-11 [mSv/(mGy×cm) ICRP-87 / MU 2.6.1.2944-11]	$D_{\text{eff}}$ , мЗв [mSv]			Разность <sup>d)</sup> с консолью, мЗв [Difference with console, mSv]			ICRP-103 [NRB 99/2009]	НРБ-99/2009 [NRB 99/2009]
				$D_{\text{eff}}^{1(b)}$	$D_{\text{eff}}^{2(b)}$	$D_{\text{eff}}^{3(c)}$	$D_{\text{eff}}^{2} - D_{\text{eff}}^{1}$	$D_{\text{eff}}^{3} - D_{\text{eff}}^{1}$			
КТ-1 [CT-1]	30,6	887,5	0,014	12,4	16,08	13,87	+3,68	+1,47	0,018	0,016	
КТ-2 [CT-2]	16,5	584,7	0,015	8,8	12,14	9,98	+3,34	+1,18	0,021	0,017	

<sup>a)</sup>  $D_{\text{eff}}^{1}$  – эффективная доза рассчитана по данным на консоли КТ–сканера с использованием взвешивающих коэффициентов ткани из ICRP-87/ MU 2.6.1.2944-11 [Calculation using coefficients from ICRP-87/ MU 2.6.1.2944-11].

<sup>b)</sup>  $D_{\text{eff}}^{2}$  – эффективная доза рассчитана на основании фантомной дозиметрии с использованием взвешивающих коэффициентов ткани из НРБ 99/2009 [Calculation using coefficients from NRB 99/2009].

<sup>c)</sup>  $D_{\text{eff}}^{3}$  – эффективная доза рассчитана на основании фантомной дозиметрии с использованием взвешивающих коэффициентов ткани из ICRP-103 [Calculation using coefficients from ICRP Publication 103].

<sup>d)</sup> Разность между значениями эффективных доз в абсолютных единицах [Difference in absolute units].

Как видно из таблицы 4, дозы, рассчитанные по результатам фантомных измерений, несколько выше, чем значения, полученные исходя из DLP на консоли КТ-сканера: при КТ-1 по НРБ 99/2009 в 1,30 раза и по ICRP-103 в 1,12 раза; при КТ-2 по НРБ 99/2009 в 1,38 раза и по ICRP-103 в 1,13 раза (с учетом разных взвешивающих коэффициентов ткани). То есть превышения  $D_{\text{eff}}$  при выполненных фантомных измерениях по сравнению с оценками по DLP на консоли при КТ-1 и КТ-2 были сходны и составляли при использовании взвешивающих коэффициентов ткани из НРБ-99/2009 30 – 38 % и из ICRP-103 – от 12 до 13 %.

Различия доз фантомных и вычисленных по DLP с консоли может быть связано с тем, что DLP рассчитывается на основе CTDIvol, а CTDIvol оценивается при периодической калибровке КТ-сканеров на стандартных (цилиндрических) фантомах диаметрами 32 см и 16 см. Однако пациенты значительно отличаются от таких фантомов по размеру и форме, в связи с чем значения CTDIvol не отражают среднюю дозу для большинства пациентов. Как указано в [5], при длине фантома 10 см исключается оценка доз от хвостов рассеяния и поэтому недооценивается поглощенная доза для типичных длин сканирования тела от 25 см и более, хотя фактическая доза будет увеличиваться в зависимости от длины сканирования. Для более точного измерения требуется фантом длиной почти 45 см, что позволяет лучше учитывать пространственное распределение облучения.

Выполненные фантомные измерения позволили определить дозовые коэффициенты  $e^{i}_{\text{DLP}}$  (мЗв/(мГр×см)) на области сканирования по методике [5, 15]: для КТ-сканера Toshiba Aquilion 64 они составили для величин взвешивающих коэффициентов ткани из НРБ 99/2009 и ICRP-103 при КТ-1 0,018 и 0,016, при КТ-2 0,021 и 0,017, соответственно. Оказалось, что полученные значения превышают дозовые коэффициенты, которые приводятся в методических указаниях МУ 2.6.1.2944-11 (приведенные значения в МУ 2.6.1.2944-11 составляют 0,014 мЗв/(мГр×см) для КТ-1 и 0,015 мЗв/(мГр×см) для КТ-2).

В нашем исследовании применялись прямые измерения дозы с помощью ТЛД, установленных в тканезквивалентном фантоме, приближенном к телосложению взрослого пациента, и к цилиндрическому фантому шириной 45 см. Такой подход позволил учесть реальные условия КТ-сканирования, включая рассеянное излучение, и продемонстрировал более высокие значения доз по сравнению со значениями, рассчитанными по DLP на консоли КТ-сканера. Ограничением метода прямой дозиметрии остаётся возможный разброс показаний ТЛД и необходимостью увеличения числа детекторов как в целом, так и в каждом органе для повышения точности. CTDIvol и DLP являются универсальными критерияльными параметрами для сопоставления доз облучения от разных КТ-сканеров, но для оценки индивидуальной дозовой нагрузки на пациента важно периодически уточнять алгоритм их расчетов на основе дозиметрических измерений [15, 17–19], в том числе, по нашему мнению, и на тканезквивалентном фантоме.

Таким образом, в ходе выполненного исследования установлено, что расчёт эффективной дозы облучения из показателя DLP, автоматически отображаемого на консоли КТ-сканера после каждого КТ-сканирования, может занижать реальную индивидуальную дозовую нагрузку на пациента от 12 до 38 %. В исследовании [20] была выявлена сходная ситуация: консольные показатели занижали фактическую дозу до 70 % либо завышали почти в два раза при среднем расхождении 10–12 %. Важность оценки таких расхождений особенно актуальна при повторных КТ сочетанных областей тела, при которых органы дозы облучения могут достигать до 100 – 200 мГр [9].

Зависимость результатов расчетов доз излучения для органов и тканей при фантомной дозиметрии от величин взвешивающих коэффициентов тканей по НРБ-99/2009 и по ICRP-103 подчёркивает важность единообразия использования этих коэффициентов для корректного сравнения результатов между разными КТ-исследованиями.

По результатам выполненных исследований органы и ткани по уровням доз облучения при КТ сочетанных анатомических областей тела можно разделить на 3 группы в зависимости от вклада в дозу на всё тело: 1) гонады, красный костный мозг, толстый кишечник, лёгкое, желудок – вклад 71,8 – 76,2 %; 2) мочевого пузыря, печень и пищевод – вклад 15,0 – 19,9 %; 3) кожа груди, живота и таза, клетки костной поверхности и «остальное» – вклад 3,8 – 11,1 %.

Уточненные в ходе фантомной дозиметрии дозовые коэффициенты  $e_{DLP}^i$  (мЗв/(мГр×см)) для двух исследованных сочетанных анатомических областей могут быть использованы при переоценке накопленных доз облучения за предшествующие годы при обследованиях на данном КТ-сканере персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения. Это позволит скорректировать коллективные оценки уровней риска отдаленных последствий облучения при КТ и, при необходимости, спланировать ограничительные меры по радиационному воздействию на пациентов при последующем облучении с медицинскими целями в ходе использования методов лучевой диагностики.

### Заключение

1. Дозиметрическая оценка с использованием тканеэквивалентного фантома и термолюминесцентных детекторов, выполненная при КТ сочетанной области (КТ-1) по коэффициентам из ICRP-103, позволила установить органы и ткани с наибольшим вкладом в дозу облучения пациента – красный костный мозг ( $2,5 \pm 0,16$  мЗв), желудок ( $2,1 \pm 0,1$  мЗв), толстый кишечник ( $1,99 \pm 0,08$  мЗв), лёгкое ( $1,89 \pm 0,16$  мЗв) и гонады ( $1,44 \pm 0,3$  мЗв).

2. Эффективная доза облучения пациента по результатам измерений на тканеэквивалентном фантоме RANDO с использованием ТЛД детекторов была несколько выше, чем рассчитанная по значениям DLP на консоли КТ-сканера в 1,12 – 1,13 раза при использовании взвешивающих коэффициентов ткани по ICRP-103 и в 1,30 – 1,38 раза при использовании взвешивающих коэффициентов ткани по НРБ-99/2009. Это может быть связано с особенностями оценки СТДlvoI на стандартных фантомах диаметрами 16 и 32 см толщиной 10 см, используемых при калибровке доз облучения КТ-сканеров, по сравнению с тканеэквивалентным фантомом RANDO, который по своим размерам соответствует телу стандартного мужчины.

3. Фантомные измерения с использованием ТЛД детекторов позволили уточнить для КТ-сканера Toshiba Aquilion 64 дозовые коэффициенты ( $e_{DLP}^i$ , мЗв/(мГр×см)) на изученные сочетанные области сканирования; они составили при использовании взвешивающих коэффициентов тканей по НРБ-99/2009 и по ICRP-103: при КТ-1, соответственно, 0,018 и 0,016; при КТ-2, соответственно, 0,021 и 0,017, в то время как в методических указаниях МУ 2.6.1.2944-11 дозовые коэффициенты равны 0,014 мЗв для КТ-1 и 0,015 мЗв для КТ-2.

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

Маткевич Е.И. – разработка дизайна исследования, определение цели и задач, обработка результатов, формирование таблиц и иллюстраций, их описание, подготовка промежуточного и окончательного варианта рукописи.

Ганцовский П.П. – дозиметрические исследования на тканеэквивалентном фантоме, калибровка ТЛД детекторов, обработка результатов дозиметрии.

Сивенков А.Г. – статистическая обработка результатов, подготовка рабочих таблиц с данными исследования.

Комаров А.Ю. – дозиметрические исследования на тканеэквивалентном фантоме.

Юрина И.Л. – подготовка ТЛД-детекторов и регистрация показаний.

Цовьянов А.Г. – согласование методик дозиметрии, редактирование промежуточного варианта рукописи.

Башков А.Н. – согласование протоколов КТ-сканирования, редактирование промежуточного варианта рукописи.

### Благодарности

Авторы благодарят профессора А.Ю. Бушманова за организационную помощь при проведении исследования, профессора В.А. Резонтова за высокопрофессиональные рекомендации по доработке статьи, доктора биологических наук В.Ю. Соловьёва за намеченные перспективы продолжения исследований, начальника отдела дозиметрического контроля и медицинской физики ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ» З.А. Лантух за ценные консультации по методологии дозиметрических измерений.

### Информированное согласие

Информированного согласия пациентов не требовалось, так как в исследовании не использовались данные пациентов.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

### Литература

- Valentin J., International Commission on Radiation Protection. Managing patient dose in multi-detector computed tomography (MDCT). ICRP Publication 102 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, № 1. P. 1-79. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.09.001.
- Report to the General Assembly, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2020/2021. United Nations, New York, 2022. [https://www.unscear.org/unscear/publications/2020\\_2021\\_1.html](https://www.unscear.org/unscear/publications/2020_2021_1.html) (Дата обращения: 17.03.2026).
- Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В. и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине. Лучевая диагностика: Монография, пособия. СПб.: НИИРГ, 2019. Т. 1. 320 с.
- Дружинина П.С. Накопленные дозы пациентов при проведении КТ-исследований в российской клинической практике // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 131-140. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-131-140.
- International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report No. 87: Radiation dose and image-quality assessment in computed tomography // International Commission on Radiation Units and Measurements. 2012. Vol. 12, № 1. P. 1-149. DOI: 10.1093/jicru/ndt007.
- Lee C., Won T., Yeom Y.S. et al. Organ dose conversion coefficients in CT scans for Korean adult males and females // Nuclear Engineering and Technology. 2022. Vol. 54, № 2. P. 681-688. DOI: 10.1016/j.net.2021.08.008.
- Cakmak E.D., Tuncel N., Sindir B. Assessment of Organ Dose by Direct and Indirect Measurements for a Wide Bore X-Ray Computed Tomography Unit That Used in Radiotherapy // International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology. 2015. Vol. 4. P. 132-142. DOI:10.4236/ijmpcero.2015.4.2017.

8. Lawson M., Berk K., Badawy M. et al. Comparison of organ and effective dose estimations from different Monte Carlo simulation-based software methods in infant CT and comparison with direct phantom measurements // *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2022. Vol. 23, № 6. P. e13625. DOI: 10.1002/acm2.13625.
9. Zewde N., Ria F., Rehani M.M. Organ doses and cancer risk assessment in patients exposed to high doses from recurrent CT exams // *European Journal of Radiology*. 2022. Vol. 149, P. 110224. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110224.
10. Gao Y., Mahmood U., Liu T. et al. Patient-Specific Organ and Effective Dose Estimates in Adult Oncologic CT // *American journal of roentgenology*. 2020. Vol. 214, № 4. P. 738-746. DOI: 10.2214/AJR.19.21197.
11. Маткевич Е.И., Сивенков А.Г., Самойлов А.С. Структура заболеваемости и дозовые нагрузки персонала, работающего с техногенными источниками излучения, направляемых на компьютерную томографию в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна в 2020 -2024 гг. // *Радиационная биология. радиоэкология*. 2025. Т. 65, № 6. С. 597–613. DOI: 10.7868/S3034590125060031.
12. The Alderson Radiation Therapy Phantom URL: <https://rsdphantoms.com/product/the-alderson-radiation-therapy-phantom/> (Дата обращения: 17.03.2026).
13. Установки дозиметрические термолюминесцентные «ДВГ-02ТМ». Описание типа средства измерений. Приложение к свидетельству №45087 об утверждении типа средств измерений. ФГУП НИИ промышленной и морской медицины (НИИПММ). С.Пб.: 2011. 5 с. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mits/497e715c-7627-ebb6c-396a-dd2871f03517> (Дата обращения: 17.03.2026).
14. Дозиметр универсальный ДКС-101. Руководство по эксплуатации. ГКПС13.00.00.000РЭ. М., 2009. 32 с. <https://ntcexpert.ru/images/stories/radiograf/dks-101-manual.pdf?ysclid=ml2vbiefj491548903> (Дата обращения: 17.03.2026).
15. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиологической защите 2007 года. М.: Алана, 2009. 344 с.
16. Дружинина Ю.В., Лантух З.А., Водоватов А.В. и др. Разработка и применение референсных диагностических уровней для взрослых пациентов в лучевой диагностике // *Медицинская физика*. 2022. Т. 93, № 1. С. 81-96. DOI:10.52775/1810-200X-2022-93-1-81-96.
17. Чипига Л.А., Голиков В.Ю., Шлеенкова Е.Н., Поздняков А.В. Оценка коэффициентов перехода от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для КТ всего тела путем фантомных экспериментов // *Медицинская физика*. 2016. Т. 72, № 4. С. 55-62.
18. Дружинина П.С., Чипига Л.А., Водоватов А.В. и др. Определение коэффициентов перехода от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для компьютерно-томографических исследований всего тела с захватом нижних конечностей пациента // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 4. С. 126-134. DOI:10.21514/1998-426X-2024-17-4-126-134.
19. Brenner D.J. It is time to retire the computed tomography dose index (CTDI) for CT quality assurance and dose optimization. For the proposition // *Medical Physics*. 2006. Vol. 33, № 5. P.1189-90. DOI: 10.1118/1.2173933.
20. Parsi M., Sohrabi M., Mianji F., Paydar R. A «Quality-control-based correction method» for displayed dose indices on CT scanner consoles in patient dose surveys // *Physica Medica*. 2017. Vol. 38. P. 88-92. DOI: 10.1016/j.ejmp.2017.05.054.

Поступила: 10.11.2025

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

ORCID: 0000-0001-5917-7706

**Ганцовский Павел Павлович** – научный сотрудник лаборатории радиационно-гигиенических исследований, Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-4600-247X

**Сивенков Александр Геннадиевич** – инженер лаборатории радиационно-гигиенических исследований отдела ионизирующих и неионизирующих излучений Центра специальных исследований, Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-7980-7680

**Комаров Артём Юрьевич** – научный сотрудник лаборатории радиационно-гигиенических исследований, Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0003-1057-0181

**Юрина Ирина Леонидовна** – инженер лаборатории радиационно-гигиенических исследований, Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0009-0006-0559-5711

**Цовьянов Александр Георгиевич** – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией радиационно-гигиенических исследований, Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-6994-0701

**Башков Андрей Николаевич** – кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, руководитель центра лучевой и радиоизотопной диагностики, Центра лучевой диагностики, Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-4560-6415

**Для цитирования:** Маткевич Е.И., Ганцовский П.П., Сивенков А.Г., Комаров А.Ю., Юрина И.Л., Цовьянов А.Г., Башков А.Н. Эффективные дозы облучения пациентов при компьютерной томографии сочетанных областей тела по данным фантомной дозиметрии // *Радиационная гигиена*. 2026. Т. 19, № 1. С. 44–55. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-44-55

## Effective radiation doses of patients in computed tomography of combined body areas according to phantom dosimetry

Elena I. Matkevich, Pavel P. Gantsovsky, Alexander G. Sivenkov, Artem Yu. Komarov, Irina L. Yurina, Alexander G. Tsovyanov, Andrey N. Bashkov

State Research Center - Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

*The aim of the study was to perform phantom dosimetry of organs and tissues to assess effective radiation doses to patients during computed tomography of combined areas of the body and calculated based on the readings on the scanner console. Materials and Methods: The study was performed on CT-scanner Toshiba Aquilion 64 an anthropomorphic tissue-equivalent phantom weighing 73.5 kg using thermoluminescent detectors located in the locations of organs and tissues, under standard computed tomography protocols of two combined body regions: 1 – organs of thorax, abdomen and pelvis; 2 – organs of abdomen and pelvis. The effective radiation dose was calculated using tissue weighting factors according to NRB-99/2009 and ICRP Publication 103 recommendations. Results and Discussion: The largest contribution to the total radiation dose was found for the gonads, red bone marrow, colon, lungs and stomach (71.8-76.2% in total). It was established that the effective radiation doses to patients during computed tomography, calculated based on the results of phantom dosimetry with TLD detectors, are higher than the values obtained from DLP data on the console of a computer scanner using tissue weighting factors according to ICRP Publication 103 for CT-1 by 1.12 times, for CT-2 by 1.13 times, according to NRB-99/2009 for CT-1 by 1.30 times, for CT-2 by 1.38 times. Conclusion: Dosimetry on an anthropomorphic tissue-equivalent phantom demonstrates higher patient radiation doses during computed tomography compared to dose values calculated by DLP on the computed tomography scanner console. This demonstrates the importance of periodically comparing patient doses calculated by DLP on the computed tomography scanner console with doses recorded by direct dosimetry under real computed tomography scanning conditions in radiology departments and centers.*

**Key words:** *computed tomography, departments and centers of radiation diagnostics, radiation safety, phantom dosimetry, thermoluminescent detectors, effective dose.*

### Authors' personal contribution

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

Gantsovsky P.P. – dosimetric measurements using the tissue-equivalent phantom.

Sivenkov A.G. – statistical analysis of the results and preparation of working data tables.

Komarov A.Yu. – dosimetric measurements using the tissue-equivalent phantom.

Yurina I.L. – preparation of TLD dosimeters and recording of measurements.

Tsovyanov A.G. – coordination of dosimetry methodology and editing of the final version of the manuscript.

Bashkov A.N. – coordination of CT scan protocols, editing of the draft of the manuscript.

### Acknowledgments

The authors thank Professor A.Yu. Bushmanov for organizational assistance in conducting the study, Professor V.A. Rezonov for highly professional recommendations on finalizing the article, Doctor of Biological Sciences V.Yu. Solovoyov for the planned prospects for continuing the research, Z.A. Lantukh - Head of the Department of Dosimetric Control and Medical Physics of the State Budgetary Healthcare Institution «Research and Clinical Center for Dosimetric Control and Medical Physics of the Department of Health of the City of Moscow» - for valuable consultations on the methodology of dosimetric measurements.

### Informed consent

Informed consent from patients was not required, since the study did not use patient data.

### Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

### Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

### References

1. Valentin J. International Commission on Radiation Protection. Managing patient dose in multi-detector computed tomography (MDCT). ICRP Publication 102. *Annals of the ICRP*. 2007;37(1): 1-79. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.09.001.
2. Report to the General Assembly, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2020/2021. United Nations, New York; 2022. [https://www.unscear.org/unscear/publications/2020\\_2021\\_1.html](https://www.unscear.org/unscear/publications/2020_2021_1.html) (Accessed: 17.03.2026).
3. Balonov MI, Golikov VYu, Vodovatov AV, Chipiga LA, Zvonova IA, Kalnitsky SA, et al. Scientific foundations of radiation protection in modern medicine. Diagnostic radiology: Monograph, manuals. Vol.1. St. Petersburg; 2019. 320 p. (In Russian).
4. Druzhinina PS. Patients' cumulative doses during CT-examinations in Russian clinical practice. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(2): 131-140. DOI:10.21514/1998-426X-2025-18-2-131-140. (In Russian).
5. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report No. 87: Radiation dose and image-quality assessment in computed tomography. *Journal*

**Elena I. Matkevich**

State Research Center - Burnasyan Federal Medical Biophysical Center

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

- International Commission on Radiation Units and Measurements.* 2012;12(1): 1-149. DOI: 10.1093/jicru/ndt007. DOI: 10.1093/jicru/ndt007.
6. Lee C, Won T, Yeom YS, Griffin K, Lee Ch, Kim KP. Organ dose conversion coefficients in CT scans for Korean adult males and females. *Nuclear Engineering and Technology.* 2022;54(2): 681-688. DOI: 10.1016/j.net.2021.08.008.
  7. Cakmak ED, Tuncel N, Sindir B. Assessment of Organ Dose by Direct and Indirect Measurements for a Wide Bore X-Ray Computed Tomography Unit That Used in Radiotherapy. *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology.* 2015;4: 132-142. DOI:10.4236/ijmpcero.2015.42017.
  8. Lawson M, Berk K, Badawy M, Yujin Qi, Kuganesan Ah, Metcalfe P. Comparison of organ and effective dose estimations from different Monte Carlo simulation-based software methods in infant CT and comparison with direct phantom measurements. *Journal of Applied Clinical Medical Physics.* 2022;23(6): e13625. DOI: 10.1002/acm2.13625.
  9. Zewde N, Ria F, Rehani MM. Organ doses and cancer risk assessment in patients exposed to high doses from recurrent CT exams. *European Journal of Radiology.* 2022;149: 110224. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110224.
  10. Gao Y, Mahmood U, Liu T, Quinn B, Gollub MJ, Xu XG, et al. Patient-Specific Organ and Effective Dose Estimates in Adult Oncologic CT. *American journal of roentgenology.* 2020;214(4): 738 – 746. DOI: 10.2214/AJR.19.21197.
  11. Matkevich EI, Sivenkov AG, Samoylov AS. The Morbidity Structure of Personnel Working with Man-Made Radiation Sources Referred for Computed Tomography at the State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency in 2020–2024. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology.* 2025;65(6): 597-613. DOI: 10.7868/S3034590125060031. (In Russian).
  12. The Alderson Radiation Therapy Phantom. Available from: <https://rsdphantoms.com/product/the-alderson-radiation-therapy-phantom/> (Accessed: 17.03.2026).
  13. Thermoluminescent Dosimetric Units «DVG-02TM». Description of the Measuring Instrument Type. Appendix to Certificate No. 45087 on Approval of the Measuring Instrument Type. Federal State Unitary Enterprise Research Institute of Industrial and Marine Medicine (NIIPMM). St. Petersburg: 2011. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mits/497e715c-7627-eb6c-396a-dd2871f03517> (Accessed: 17.03.2026). (In Russian).
  14. Universal dosimeter DKS-101. Operation manual. GKPS13.00.00.000RE. Moscow, 2009. <http://медтехатом.рф/upload/iblock/1e0/1e0571199faeb4116640a1fbf1666162.pdf> (Accessed: 17.03.2026). (In Russian).
  15. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Annals of the ICRP.* 2007;37(2-4): 1-332. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003. (In Russian).
  16. Druzhinina YuV, Lantukh ZA, Vodovatov AV, Morozov SP, Ryzhov SA, Sokolov EN, et al. Development and Application of Diagnostic Reference Levels for Adult Patients in Diagnostic Radiology. *Meditsinskaya Fizika = Medical Physics.* 2022;93(1): 81-96. DOI: 10.52775/1810-200X-2022-93-1-81-96. (In Russian).
  17. Chipiga L, Golikov V, Shleenkova E, Pozdnyakov A. Estimation of the conversion coefficients from dose length product to effective dose from whole body computed tomography examination using anthropomorphic phantoms. *Meditsinskaya Fizika = Medical Physics.* 2016;72(4): 55-62. (In Russian).
  18. Druzhinina PS, Chipiga LA, Vodovatov AV, Soldatov IV, Lantukh ZA, Tolkachev KV. Determination of the conversion coefficients from the dose-length product to the effective dose for CT-examinations of the whole body including lower extremities. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2024;17(4): 126-134. DOI:10.21514/1998-426X-2024-17-4-126-134. (In Russian).
  19. Brenner DJ. It is time to retire the computed tomography dose index (CTDI) for CT quality assurance and dose optimization. For the proposition. *Meditsinskaya Fizika = Medical Physics.* 2006;33(5): 1189-90. DOI: 10.1118/1.2173933.
  20. Parsi M, Sohrabi M, Mianji F, Paydar R. A «Quality-control-based correction method» for displayed dose indices on CT scanner consoles in patient dose surveys. *Physica Medica.* 2017;38: 88-92. DOI: 10.1016/j.ejmp.2017.05.054.

Received: November 10, 2025

**For correspondence: Elena I. Matkevich** – Candidate of Medical Sciences, Radiologist, Head of the Department of MRI Diagnostics of the Radiology Center based on State Research Center - Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency. (23, Marshal Novikov str., Moscow, 123098, Russia; E-mail: ei.matkevich@yandex.ru)  
ORCID: 0000-0001-5917-7706

**Pavel P. Gantsovsky** – Research Associate at the Laboratory of Radiation and Hygienic Research of the A.I. Burnazyan Federal Medical and Biological Center of Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0002-4600-247X

**Alexander G. Sivenkov** – Engineer of Laboratory No. 25 (Laboratory of Radiation and Hygienic research) of the Department of Ionizing and non-ionizing Radiation on State Research Center - Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0001-7980-7680

**Artem Yu. Komarov** – Researcher at the Laboratory of Radiation and Hygienic Research at the A.I. Burnazyan Federal Medical and Biological Center of the Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0003-1057-0181

**Irina L. Yurina** – Engineer at the Laboratory of Radiation and Hygienic Research at the A.I. Burnazyan Federal Medical and Biological Center of Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russia  
ORCID: 0009-0006-0559-5711

**Alexander G. Tsovyanov** - Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Radiation and Hygienic Research, A.I. Burnazyan Federal Medical and Biological Center of Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0001-6994-0701

**Andrey N. Bashkov** – Candidate of Medical Sciences, Radiologist, Head of the Radiology Center based on State Research Center - Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0002-4560-6415

**For citation: Matkevich E.I., Gantsovsky P.P., Sivenkov A.G., Komarov A.Yu., Yurina I.I., Tsovyanov A.G., Bashkov A.N. Effective radiation doses of patients in computed tomography of combined body areas according to phantom dosimetry. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 44–55. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-44-55**

## Методика расчёта эффективных доз при проведении рентгенографических процедур как инструмент анализа формы №3-ДОЗ

Косарлукова Е.А.<sup>1</sup>, Водоватов А.В.<sup>1,2</sup>, Библин А.М.<sup>1</sup>, Ахматдинов Р.Р.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

*Форма №3-ДОЗ широко применяется для анализа уровней облучения пациентов при проведении рентгенографических процедур. При этом прямое использование данных по средним эффективным дозам пациентов из формы №3-ДОЗ для сравнения с результатами собственных исследований некорректно, так как в форме №3-ДОЗ представлены эффективные дозы, усредненные по проекциям облучения пациентов. Это приводит к значительной пере- или недооценке результатов сравнения. Целью данной работы являлась разработка методики определения эффективных доз за прямую или боковую проекцию при проведении рентгенографических процедур по данным формы №3-ДОЗ. Материалы и методы: В работе использованы данные из региональных банков данных формы №3-ДОЗ для Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Разработана оригинальная методика расчета эффективных доз за проекцию. Результаты исследования и обсуждение: определены эффективные дозы для наиболее распространенных рентгеновских процедур, выполненных на цифровых и аналоговых рентгеновских аппаратах в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в 2023 году. Заключение: Представленную методику целесообразно интегрировать в программное обеспечение для заполнения формы №3-ДОЗ.*

**Ключевые слова:** ЕСКИД, форма №3-ДОЗ, эффективная доза, рентгенографические процедуры, рентгенографические исследования, пациенты.

### Введение

Форма федерального государственного статистического наблюдения №3-ДОЗ системы ЕСКИД является основным инструментом для оценки уровней медицинского облучения и структуры лучевой диагностики населения Российской Федерации [1–3]. Данная форма позволяет для каждой организации, эксплуатирующей медицинские источники ионизирующего излучения, для каждого вида лучевой диагностики, для каждого выполняемого рентгенорадиологического исследования (РПИ) или процедуры (РПП)<sup>1</sup> определить следующие показатели: число выполненных за отчетный период процедур и исследований, коллективную дозу за счет выбранного РПП, среднюю эффективную дозу за процедуру (СДП). Данные показатели широко используются для качественной и количественной сравнительной оценки доз облучения пациентов. При этом, в рамках такой оценки СДП, полученная из формы №3-ДОЗ, сравнивается с эффективными дозами, определенными в рамках экспериментальных работ или собственных сборов данных [1–3].

Прямое сравнение СДП из формы №3-ДОЗ и данных собственных исследований является приемлемым для всех видов РПП за исключением рентгенографии. В клинической

практике все рентгенографические исследования представляют собой набор из отдельных процедур – рентгеновских снимков, выполненных в различных проекциях (прямой, боковых, косых) [4–5]. Каждая процедура будет ассоциирована с различными дозами облучения и вносит различный вклад в суммарную эффективную дозу (ЭД) пациента за исследование. В соответствии с методикой заполнения формы №3-ДОЗ на объектовом уровне, для определения СЭД необходимо сложить все эффективные дозы пациентов, которым была выполнена выбранная РПП выбранной анатомической области и разделить их на число выполненных процедур (рентгеновских снимков). Полученная СЭД усреднена по всем проекциям облучения пациента и не является достоверной оценкой дозы облучения пациента за рентгеновский снимок, выполненный в конкретной проекции, или за исследование в целом [6–8] в том случае, если исследование включает в себя несколько рентгеновских снимков. Таким образом, сравнивать данные из формы №3-ДОЗ напрямую с результатами определения эффективных доз при проведении рентгеновских процедур некорректно.

Для решения данной проблемы необходима методика, позволяющая на основе доступных данных из банков данных формы №3-ДОЗ рассчитать эффективную дозу за отдельную проекцию и определить её относительный вклад в эффективную дозу за РПИ.

<sup>1</sup> Одна РПП эквивалентна одному рентгеновскому снимку, выполненному в рамках РПИ. РПИ может включать в себя одно или несколько РПП, выполненных в одной и той же, или разных проекциях.

**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

**Цель исследования** – разработка методики оценки эффективных доз для различных проекций облучения пациентов при проведении РРП по данным региональных форм № 3-ДОЗ за 2023 год.

**Материалы и методы**

Были использованы данные из регионального банка данных формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований» по Санкт-Петербургу и Ленинградской области за 2023 год. Были выбраны наиболее распространенные РРП и РРИ (рентгенографии черепа, органов грудной клетки (ОГК), шейного, пояснично-крестцового и грудного отделов позвоночника, таза, ребер, брюшной полости), проведенные на цифровых и аналоговых аппаратах для взрослых пациентов. Расчет СЭД за процедуру проводили по методике, описанной в предыдущей работе авторов [1]. Для определения эффективной дозы за проекцию облучения была разработана специальная методика, основанная на соотношении проекций в исследовании и вклада проекций в ЭД за исследование. При этом принималось, что выбранные РРИ состоят только из процедур, выполненных в прямой и боковой проекциях. Методика включала в себя следующие этапы:

Этап 1. Определение суммы РРИ ( $N_x$ ) – из общего количества РРИ по областям исследований (форма

№ 3-ДОЗ, таблица 2.2, столбец 14) были исключены все исследования, не входящие в рентгенографические (форма № 3-ДОЗ, таблица 2.2, столбцы 5–12: рентгеноскопии, компьютерные томографии, интервенционные исследования, прочие исследования). Из исследования ОГК были исключены профилактические процедуры (форма № 3-ДОЗ, таблица 2.2, строка 2).

Этап 2. Определение суммы РРП ( $N_{px}$ ) путем суммирования числа процедур, проведенных на цифровых и аналоговых аппаратах (форма № 3-ДОЗ, таблица 2.2, столбцы 3 и 4). Из процедур ОГК были исключены профилактические процедуры (форма № 3-ДОЗ, таблица 2.2, строка 2).

Этап 3. Определение соотношения прямых и боковых проекций для выбранных РРИ ( $R_x$ ) с использованием выражения (1):

$$R_x = \frac{N_{px}}{N_{ix}} \quad (1)$$

Для каждого РРИ количество прямых проекций ( $P_{front}$ ) принимали равным 1; количество боковых проекций ( $P_{latx}$ ) определялось с использованием выражения (2):

$$P_{latx} = R_x - 1 \quad (2)$$

Этап 4. Определение числа процедур по проекциям ( $N_p$ ). Определение числа процедур, выполненных в прямой проекции для аналоговых ( $N_{p a front x}$ ) и цифровых ( $N_{p d front x}$ ) рентгенографических исследований с использованием выражений (3) и (4):

$$N_{p a front x} = \frac{\text{Число процедур (форма № 3 – ДОЗ таблица 2.2, столбец 3)}}{R_x} \quad (3)$$

$$N_{p d front x} = \frac{\text{Число процедур (форма № 3 – ДОЗ таблица 2.2, столбец 4)}}{R_x} \quad (4)$$

Определение числа процедур, выполненных в боковой проекции ( $N_{p a lat x}$ ,  $N_{p d lat x}$ ) путем вычитания числа процедур в прямой проекции из общего числа процедур (форма № 3-ДОЗ, таблица 2.2, столбцы 3 и 4) для выбранного рентгенографического исследования. Из процедур ОГК были исключены профилактические процедуры.

Этап 5. Определение эффективных доз за прямую, боковую проекции и исследование для выбранных рентгенографических исследований. Для определения эффективных доз для прямых и боковых проекций выбранных РРИ были использованы следующие множители соотношения вкладов в дозу прямых и боковых проекций (табл. 1). Соотношение получено с использованием выражения (5) по итогам анализа данных по РРИ [8]:

$$M_{lat} = \frac{\text{СЭД за процедуру в боковой проекции}}{\text{СЭД за процедуру в прямой проекции}} \quad (5)$$

Определение эффективных доз за процедуру, выполненную в прямой проекции, для выбранных аналоговых ( $E_{a front x}$ ) и цифровых ( $E_{d front x}$ ) рентгенографических исследований осуществлялось с использованием выражений (6) и (7):

Таблица 1. Множители соотношения вкладов в эффективную дозу прямых и боковых проекций для выбранных рентгенографических исследований [Table 1. Contribution ratio multipliers of frontal and lateral projections to the effective dose for selected radiographic studies]

Множитель [Weighting factor]	$M_{front}$	$M_{lat}$
Проекция [Projection]	Прямая [Frontal]	Боковая [Lateral]
Органы грудной клетки [Chest]	1	1,9
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	1	0,7
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	1	0,7
Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	1	1,1
Таз [Pelvis]	1	1
Ребра [Ribs]	1	1
Органы брюшной полости [Abdominal]	1	1
Череп [Skull]	1	0,5

$$E_{a \text{ front } x} = \frac{\text{Коллективная доза за выбранную РГ процедуру}}{(N_{p \text{ a front } x} \cdot M_{\text{front}}) + (N_{p \text{ a lat } x} \cdot M_{\text{lat}})} \cdot 1000, \text{ мЗв} \quad (6)$$

$$E_{d \text{ front } x} = \frac{\text{Коллективная доза за выбранную РГ процедуру}}{(N_{p \text{ d front } x} \cdot M_{\text{front}}) + (N_{p \text{ d lat } x} \cdot M_{\text{lat}})} \cdot 1000, \text{ мЗв} \quad (7)$$

Из коллективной дозы за процедуру рентгенографии ОГК были исключены дозы за профилактические процедуры (форма № 3-ДОЗ, таблица 2.1, строка 02).

Определение эффективных доз за процедуру, выполненную в боковой проекции, для выбранных аналоговых ( $E_{a \text{ lat } x}$ ) и цифровых ( $E_{d \text{ lat } x}$ ) рентгенографических исследований осуществлялось с использованием выражений (8) и (9):

$$E_{a \text{ lat } x} = E_{a \text{ front } x} \cdot M_{\text{lat}}, \text{ мЗв} \quad (8)$$

$$E_{d \text{ lat } x} = E_{d \text{ front } x} \cdot M_{\text{lat}}, \text{ мЗв} \quad (9)$$

Определение эффективных доз за исследование целиком для выбранных аналоговых ( $E_{a \text{ x}}$ ) и цифровых ( $E_{d \text{ x}}$ ) рентгенографических исследований (10) и (11):

$$E_{a \text{ x}} = E_{a \text{ front } x} + E_{a \text{ lat } x}, \text{ мЗв} \quad (10)$$

$$E_{d \text{ x}} = E_{d \text{ front } x} + E_{d \text{ lat } x}, \text{ мЗв} \quad (11)$$

Проверка данных, представленных в региональных формах № 3-ДОЗ, на достоверность осуществлялась по значениям сумм исследований, не входящих в рентгенографические исследования, и сумм рентгенографических исследований. При получении отрицательных значений для одного или нескольких рентгенографических исследований данные исследования для данного региона в дальнейшем из расчетов исключались.

Обработка и анализ данных осуществлялись с использованием программного обеспечения Statistica 12 и Microsoft Excel.

### Результаты и обсуждение

Соотношения прямых и боковых проекций по данным формы № 3-ДОЗ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Соотношение числа рентгеновских снимков, выполненных в прямой и боковой проекциях, для наиболее распространенных рентгеновских исследований

[Table 2. Ratio of the number of radiographic images taken in frontal and lateral projections for the most common radiographic examinations]

Анатомическая область [Anatomic region]	Соотношение прямых и боковых проекций $R_x$ [Ratio of frontal to lateral projections $R_x$ ]	Количество прямых проекций $N_{p \text{ front}}$ [Number of frontal projections $N_{p \text{ front}}$ ]	Количество боковых проекций $N_{p \text{ lat}}$ [Number of lateral projections $N_{p \text{ lat}}$ ]
Органы грудной клетки [Chest]	1,87	1	0,87
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	1,98	1	0,98
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	1,83	1	0,83
Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	1,88	1	0,88
Таз и бедро [Pelvis and hip]	1,37	1	0,37
Ребра и грудина [Ribs and sternum]	1,29	1	0,29
Органы брюшной полости [Abdominal]	1,67	1	0,67
Череп, гол. мозг, ЧЛО [Skull, brain, and craniofacial region]	1,31	1	0,31

Как следует из таблицы 2, все РПИ можно разделить на две группы по соотношению прямых и боковых проекций в исследовании:

- 1 группа (органы грудной клетки, конечности, позвоночник): на 1 снимок в прямой проекции приходится 0,8–0,9 снимков в боковой проекции;
- 2 группа (таз, ребра, череп): на 1 снимок в прямой проекции приходится 0,3 снимка в боковой проекции.

Отдельно следует выделить органы брюшной полости, для которых соотношение прямых и боковых проекций составляет 1 к 0,6.

На основании методики, представленной в разделе «Материалы и методы», по данным региональных форм №3-ДОЗ за 2023 год был проведен расчет эффективной дозы за процедуру в прямой и боковой проекции и дозы за исследование взрослых пациентов (табл. 3).

Таблица 3. Эффективные дозы за проекцию и исследование взрослых пациентов для наиболее распространенных рентгенографических процедур в Санкт-Петербурге и Ленинградской области

[Table 3. Effective doses per projection and per examination for the most common radiographic procedures in Saint Petersburg and Leningrad Oblast]

Анатомическая область [Anatomic region]	Санкт-Петербург [Saint Petersburg]						Ленинградская область [Leningrad Oblast]									
	Аналоговые рентгеновские аппараты [Analogue X-ray units]			Цифровые рентгеновские аппараты [Digital X-ray units]			Аналоговые рентгеновские аппараты [Analogue X-ray units]			Цифровые рентгеновские аппараты [Digital X-ray units]						
	П <sup>1</sup> [F]	Б <sup>2</sup> [L]	И <sup>3</sup> [E]	СЭД <sup>4</sup> [AED]	П <sup>1</sup> [F]	Б <sup>2</sup> [L]	И <sup>3</sup> [E]	СЭД <sup>4</sup> [AED]	П <sup>1</sup> [F]	Б <sup>2</sup> [L]	И <sup>3</sup> [E]	СЭД <sup>4</sup> [AED]				
Органы грудной клетки [Chest]	0,25	0,47	0,72	0,34	0,05	0,10	0,15	0,07	0,10	0,18	0,28	0,15	0,06	0,12	0,18	0,07
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	0,36	0,25	0,61	0,31	0,11	0,06	0,17	0,09	0,16	0,11	0,28	0,14	0,12	0,07	0,18	0,09
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	0,46	0,32	0,78	0,40	0,21	0,15	0,36	0,18	0,43	0,30	0,72	0,37	0,15	0,10	0,25	0,13
Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	0,61	0,67	1,28	0,64	0,32	0,35	0,66	0,33	0,55	0,61	1,16	0,58	0,23	0,25	0,48	0,24
Органы малого таза [Pelvis]	0,66	0,66	1,32	0,66	0,25	0,25	0,51	0,25	-	-	-	-	0,34	0,34	0,68	0,34
Тазобедренный сустав [Hip]	0,54	0,54	1,08	0,54	0,30	0,30	0,60	0,30	0,56	0,56	1,12	0,56	0,16	0,16	0,33	0,16
Ребра и грудина [Ribs and sternum]	0,30	0,30	0,59	0,30	0,12	0,12	0,24	0,12	0,38	0,38	0,76	0,38	0,15	0,15	0,30	0,15
Органы брюшной полости [Abdominal]	0,26	0,26	0,52	0,26	0,28	0,28	0,57	0,28	0,76	0,76	1,51	0,76	0,26	0,26	0,52	0,26
Череп, гол. мозг, ЧЛЮ [Skull, brain, and craniofacial region]	0,18	0,09	0,27	0,16	0,08	0,04	0,12	0,07	0,10	0,05	0,14	0,08	0,05	0,03	0,08	0,05

<sup>1</sup> П – Прямая проекция, получено по выражениям (6) и (7) для выбранных аналоговых и цифровых аппаратов [F – Frontal projection, obtained from expressions (6) and (7) for selected analog and digital X-ray units].

<sup>2</sup> Б – Боковая проекция, получено по выражениям (8) и (9) для выбранных аналоговых и цифровых аппаратов [L – Lateral projection, obtained from expressions (8) and (9) for selected analog and digital X-ray units].

<sup>3</sup> И – Исследование - получено по выражениям (10) и (11) - доза за исследование посчитана как сумма доз, полученных в ходе одной процедуры в прямой и одной процедуры в боковой проекции [E – Examination obtained from expressions (10) and (11) - the examination dose is calculated as the sum of doses from one frontal and one lateral projection].

<sup>4</sup> СЭД – средняя эффективная доза за процедуру по региону по данным формы №3-ДОЗ, рассчитана по методике [1] [AED – Average effective dose per diagnostic procedure according to Form No. 3-DOZ, calculated using the methodology of [1]].

Результаты, представленные в таблице 3, позволяют разделить все рентгенографические процедуры по степени отклонения получаемой дозы от среднего значения эффективной дозы:

- Минимальные отклонения (до 20 %): исследования грудного, поясничного отделов позвоночника, органов малого таза, тазобедренного сустава, рёбер с грудиной и брюшной полости. К данным процедурам относятся те процедуры, у которых соотношение эффективных доз за проекцию идентично (см. табл. 1).

- Выраженные отклонения (свыше 20 %): рентгенография органов грудной клетки, шейного отдела позвоночника, а также черепа, головного мозга и ЧЛО.

При этом эффективные дозы за РПИ (два снимка в прямой и боковой проекции) для всех анатомических областей превышают соответствующие СЭД более чем в полтора-два раза.

Полученные значения эффективных доз РПП в прямой и боковой проекциях, а также за РПИ в целом необходимо использовать для оценки уровней облучения пациентов в отдельных медицинских организациях, и для сравнения с собственными сборами данных.

Представленная методика не может полноценно заменить проведение выделенных сборов данных по уровням облучения пациентов в медицинских организациях, так как основана на ряде допущений и ограничений:

- для всех РПП используется фиксированное соотношение прямых и боковых проекций с исключением иных проекций (косых, кранио-каудальных и пр.);

- для всех рентгенографических процедур используется фиксированное соотношение эффективных доз между прямой и боковой проекциями, которое может отличаться в зависимости от типа оборудования и протоколов проведения процедур;

- методика основана на анализе формы №3-ДОЗ с минимальной верификацией полученных данных;

- эффективные дозы за прямую и боковую проекции все равно определяются как усредненные по всей медицинской организации в целом вне зависимости от количества рентгеновских аппаратов.

### Заключение

Возможность оценки эффективных доз по проекциям существенно повышает ценность данных из формы №3-ДОЗ и позволяет в дальнейшем использовать обработанные данные для использования в контексте оптимизации посредством установления референтных диагностических уровней.

Выполненная работа в очередной раз демонстрирует принципиальный недостаток формы №3-ДОЗ – чрезмерное укрупнение и обобщение данных, не позволяющее проводить полноценный анализ данных без разработки трудоемких методов анализа. В рамках развития и совершенствования формы №3-ДОЗ для РПП необходимо вводить учёт доз облучения по проекциям раздельно.

### Ограничения исследования

Соотношения структуры исследования ( $R_x$ ) посчитано как среднее значение по данным всероссийской формы №3-ДОЗ за период с 2020 по 2022 год. Множители соотношения вкладов в эффективную дозу прямых и боковых проекций ( $M_{front}$  и  $M_{lat}$ ) получены с использованием выражения (1)

по итогам анализа данных по рентгенографическим исследованиям [8]. Указанные переменные могут меняться в регионах в зависимости от применяемых протоколов проведения исследований, что требует проведения собственного сбора данных для уточнения результатов. Эффективные дозы, представленные в таблице 3, были рассчитаны как сумма доз за одну процедуру в прямой проекции и одной процедуры в боковой проекции. Вклад процедур, проведенных в косых проекциях, не учитывался.

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

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

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

Библин А.М. редактировал промежуточный вариант рукописи.

Ахматдинов Р.Р. редактировал промежуточный вариант рукописи.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

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

### Литература

1. Водоватов А.В., Косарлукова Е.А., Библин А.М. и др. Анализ уровней медицинского облучения населения Российской Федерации в 2023 г. с использованием актуализированной формы №3-ДОЗ // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, №1. С. 85-99. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-85-99.
2. 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.
3. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 2. Характеристика источников и доз облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, №3. С. 18-35. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35.
4. Кишковский А.Н., Тютин Л.А., Есиновская Г.Н. Атлас укладок при рентгенологических исследованиях. М.: Издательство "Медицина", 2012. 516 с.
5. Основы лучевой диагностики и терапии: национальное руководство / под ред. С. К. Тернового. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 992 с.
6. Дружинина Ю.В., Водоватов А.В., Охрименко С.Е. Сравнительный анализ эффективных доз, рассчитанных по разным методикам, для пациентов при проведении исследований на рентгенодиагностических аппаратах

- общего назначения // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101, № 2. С. 124-131. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-2-124-131.
7. Историк О.А., Водоватов А.В., Романович И.К. и др. Анализ уровней облучения населения Ленинградской области в лучевой диагностике за период 2010-2019 гг. // Медицина и организация здравоохранения. 2022. Т. 7, № 4. С. 80-95.
8. Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А. и др. Анализ уровней облучения взрослых пациентов при проведении наиболее распространенных рентгенографических исследований в Российской Федерации в 2009–2014 гг. // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 66-75. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75.

Поступила: 29.01.2026

**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

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

ORCID: 0000-0002-5191-7535

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

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

ORCID: 0009-0000-2300-6788

**Для цитирования:** Косарлукова Е.А., Водоватов А.В., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р. Методика расчёта эффективных доз при проведении рентгенографических процедур как инструмент анализа формы №3-ДОЗ // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 56–62. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-56-62

## Methodology for calculating average effective doses in radiography procedures as a tool for analyzing Form No. 3–DOZ

Elena A. Kosarlukova<sup>1</sup>, Aleksandr V. Vodovatov<sup>1,2</sup>, Artem M. Biblin<sup>1</sup>, Ruslan R. Akhmatdinov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

*Form №3-DOZ is commonly used to analyze patient doses from radiographic procedures. However, direct comparison of average effective dose data from Form №3-DOZ with results of experimental studies is inappropriate, as Form №3-DOZ presents effective doses averaged over the patient's exposure projections. This leads to significant over- or underestimation of the comparison results. The aim of this study was to develop a method for estimating average effective doses per frontal or lateral projection for common radiographic procedures using Form №3-DOZ data. Materials and Methods: The study was based on the data from the regional databanks of Form № 3-DOZ for Saint Petersburg and Leningrad regions; an original method for calculating average effective doses per projection has been developed. Results and Discussion: average effective doses for the most common X-ray procedures performed on digital and analog X-ray units in St. Petersburg and the Leningrad Region in 2023 were determined. Conclusion: It is advisable to integrate this method into software for completing Form №3-DOZ.*

**Key words:** ESKID, No. 3-DOZ, effective dose, radiographic procedures, patients.

**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

### Limitations of the Study

The structure ratios of the study (Rx) were calculated as the average value based on the data from the all-Russian Form No. 3-DOZ for the period from 2020 to 2022. The multipliers for the contribution ratios to the effective dose from the frontal and lateral projections ( $M_{\text{front}}$  and  $M_{\text{lat}}$ ) were obtained using Expression 5, based on the analysis of data from X-ray examinations [8]. These variables may be subject to change, which necessitates conducting our own data collection to refine the results. The effective doses presented in Table 3 were calculated as the sum of the doses received from one procedure in the frontal projection and one procedure in the lateral projection. The contribution of procedures performed in oblique projections was not taken into account.

### Authors' personal contribution

Aleksandr V. Vodovatov developed design of the study, determined aims and objectives, prepared draft of the manuscript.

Elena A. Kosarlukova performed data analysis, prepared draft of the manuscript.

Artem M. Biblin prepared draft of the manuscript.

Ruslan R. Akhmatdinov prepared draft of the manuscript.

### Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

### Sources of funding

The study was not supported by sponsorship. The study was performed within framework of research project "Scientific substantiation of the Concept for ensuring radiation safety of the population of the Russian Federation during modern X-ray radiological procedures."

### References

- Vodovatov AV, Kosarlukova EA, Biblin AM, Akhmatdinov RR, Bratilova AA. Analysis of medical exposure levels of the Russian Federation population in 2023 using the updated form No. 3-DOZ. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(1): 85-99. (In Russian) DOI:10.21514/1998-426X-2025-18-1-85-99 [Accessed 25 January 2026].
- Onishchenko GG, Popova AY, 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 [Accessed 25 January 2026].
- Onishchenko GG, Popova AY, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation Report 2: Characteristics of the sources and exposure doses of the population of the RF. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 18-35. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35 [Accessed 25 January 2026].
- Kishkovsky AN, Tyutin LA, Esinovskaya GN. Atlas of Patient Positioning in Radiological Studies. Moscow: Meditsina Publishing House; 2012. 516 p.
- Ternovoy SK, editor. Fundamentals of Radiation Diagnostics and Therapy: A National Guide. Moscow: GEOTAR-Media; 2012. 992 p.
- Druzhinina YV, Vodovatov AV, Okhrimenko SE. Comparative analysis of effective doses to patients undergoing examination on general-purpose X-ray machines, calculated by various methods. *Hygiene and Sanitation*. 2022;101(2): 124-131. (In Russian) DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-2-124-131 [Accessed 25 January 2026].
- Istoriy OA, Vodovatov AV, Romanovich IK, Eremina LA, Druzhinina PS, Puzyrev VG. Analysis of the population exposure levels of radiation diagnostics in the Leningrad region in 2010-2019. *Meditsina i organizatsiya zdruvookhraneniya = Medicine and Healthcare organization*. 2022;7(4): 81-95. (In Russian).
- Vodovatov AV, Golikov VY, Kalnitsky SA, Shatsky IG, Chipiga LA. Evaluation of levels of exposure of adult patients from common radiographic examinations in the Russian Federation in 2009–2014. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3):66-75. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75 [Accessed 25 January 2026].

Received: January 29, 2026

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

ORCID: 0009-0007-6476-9571

**For correspondence: 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 Rights Protection and Human Wellbeing; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovato@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-5191-7535

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

**Ruslan R. Akhmatdinov** – Researcher Engineer, 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: 0009-0000-2300-6788

**For citation: Kosarlukova E.A., Vodovatov A.V., Biblin A.M., Akhmatdinov R.R. Methodology for calculating average effective doses in radiography procedures as a tool for analyzing Form No. 3-DOZ. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 56–62. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-56-62**

## Оценка радиопротекторного потенциала фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумата при действии $\gamma$ -излучения, протонов и ионов $^{12}\text{C}$ на клетки человека

Купцова П.С.<sup>1</sup>, Комарова Л.Н.<sup>1</sup>, Ольховая Е.Р.<sup>1</sup>, Лапенко А.К.<sup>1</sup>, Шкавров С.В.<sup>1</sup>, Купцов И.С.<sup>1</sup>, Сабуров В.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Обнинский институт атомной энергетики — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

<sup>2</sup> Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

*Актуальность исследования новых радиопротекторов обусловлена потребностью в защите здоровых тканей при лучевой терапии. Существующие препараты имеют серьёзные побочные эффекты, что требует поиска более безопасных и эффективных аналогов. Цель работы — сравнительный анализ радиопротекторной эффективности трех перспективных соединений — фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумата в условиях in vitro. Задачи: определить нетоксичные концентрации соединений, оценить их защитное действие при разных типах излучения ( $\gamma$ -кванты, протоны, ионы  $^{12}\text{C}$ ), сравнить влияние на нормальные (фибробласты Фб-hTERT) и опухолевые (нейробластома SK-N-BE(2)) клетки. Материалы и методы: Исследование проводилось на культурах клеток под воздействием ионизирующих излучений разного качества: гамма-квантов ( $^{60}\text{Co}$ ), протонов и ускоренных ионов  $^{12}\text{C}$ . Установлены оптимальные концентрации: фумаровая кислота — 400 мкМ, фумарат 3-гидроксипиридина — 200 мкМ, деанола ацеглумат — 1000 мкМ. Время инкубации — 24 часа. Результаты исследования и обсуждение: Показано, что все соединения проявили значимый радиозащитный эффект при  $\gamma$ -облучении (1–12 Гр) для фибробластов, на опухолевые клетки также наблюдалось защитное действие. При облучении протонами и ионами  $^{12}\text{C}$  радиопротекторный эффект отсутствовал. Деанола ацеглумат продемонстрировал наибольшую эффективность. Заключение: Таким образом, исследование подтвердило перспективность деанола ацеглумата и других соединений как радиопротекторов при  $\gamma$ -облучении. Их применение может снизить повреждение здоровых тканей при лучевой терапии. Однако для протонов и тяжёлых ионов защитный эффект не выявлен, что требует дальнейшего изучения.*

**Ключевые слова:** радиопротекторы, гамма-излучение, ионы  $^{12}\text{C}$ , протоны, фумаровая кислота, фумарат 3-гидроксипиридина, деанола ацеглумат.

### Введение

Актуальность разработки новых радиопротекторов обусловлена глобальным ростом онкологической заболеваемости и широким применением лучевой терапии, которая используется у 50–60 % онкологических пациентов [1, 2]. Несмотря на эффективность лучевой терапии, ее основной недостаток — повреждение здоровых тканей, приводящее к острым (мукозиты, дерматиты) и отсроченным осложнениям (фиброзы, вторичные опухоли) [3]. Современные методы адронной терапии (протоны, углеродные пучки), хотя и эффективны для глубоко расположенных и радиорезистентных опухолей, имеют существенные ограничения: фрагментация тяжелых ионов создает дополнительную дозовую нагрузку на здоровые ткани [4].

Следует отметить, что в Российской Федерации официально зарегистрированы радиопротекторы Б-190 (индралин) и цистамин [5]. Однако их эффективность в отношении защиты от вторичных продуктов фрагментации тяжелых ионов

требует дальнейшего изучения. Клиническое применение этих соединений ограничено рядом факторов: высокой токсичностью (проявляющейся сердечно-сосудистыми реакциями и тошнотой/рвотой), а также кратковременностью защитного действия. Альтернативой служат природные соединения (флавоноиды, куркумин, хлорогеновая кислота) [6]. Природные соединения-антиоксиданты обладают низкой токсичностью, но их эффективность против плотноионизирующего излучения (протоны, ионы углерода) низка, а действие неселективно — они защищают и опухолевые клетки [7, 8, 9].

Анализ литературных источников и базы данных radioprotectors.org [10], выявил ряд нерешенных вопросов. Во-первых, отсутствуют исследования по метаболитам цикла Кребса (например, фумаратам) как потенциальным радиопротекторам. Также существует значительный недостаток данных о сравнительной эффективности при разных типах излучения ( $\gamma$ -кванты, тяжелые ионы).

Перспективными направлениями являются исследование метаболитов цикла Кребса (например, фумаратов)

**Купцова Полина Сергеевна**

Обнинский институт атомной энергетики

**Адрес для переписки:** 249039, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», город Обнинск, тер. Студгородок, д. 1; E-mail: kuptsova\_apollinaria@mail.ru

и сравнительный анализ эффективности их радиопротекторного действия при разных типах излучения ( $\gamma$ -кванты, тяжелые ионы). В частности, фумаровая кислота, фумарат 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумат демонстрируют антиоксидантные, нейропротекторные и мембраностабилизирующие свойства, что делает их кандидатами для разработки новых радиопротекторов.

Фумаровая кислота ( $C_4H_4O_4$ ) активирует Nrf2-путь, снижая окислительный стресс, и обладает противовоспалительным действием [11, 12]. Фумарат 3-гидроксипиридина ( $C_9H_7NO_5$ ) сочетает антирадикальную активность и обладает кардиопротекцией [13], а деанола ацеглумат ( $C_{13}H_{25}N_2O_5$ ) – ноотроп с доказанной гепатопротекцией и ингибированием перекисного окисления липидов [14, 15, 16, 17, 18].

Учитывая выраженные антиоксидантные и антирадикальные свойства описанных соединений, особую актуальность приобретает исследование их потенциальных радиопротекторных качеств. Сравнительный анализ проводили с использованием известного радиопротектора цистамина.

**Цель исследования** – сравнительный анализ радиопротекторной эффективности трех перспективных соединений – фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумата в условиях *in vitro*. В работе исследовалась селективность защиты при воздействии на нормальные (фибробласты Фб-hTERT) и опухолевые клетки (нейробластома SK-N-BE(2)), а также зависимость от ЛПЭ (линейная передача энергии), а именно эффективность при  $\gamma$ -облучении (низкая ЛПЭ) и облучении ионами  $^{12}C$  и протонами (высокая ЛПЭ).

## Материалы и методы

### Объект исследования

Клеточные линии: Фб-hTERT (теломеризованные фибробласты кожи человека) и SK-N-BE(2) (клетки нейробластомы). Клеточные культуры приобретались в банке клеточных культур ООО «Биолот».

### Методика

Клетки культивировали по стандартной методике [19]. Культивация происходила в пластиковых культуральных флаконах («Corning», США) в виде монослоя в полной питательной среде DMEM («ПанЭко», Россия). Поддерживали жизнеспособность культур в  $CO_2$ -инкубаторе при температуре 37 °C («СВ 53 Binder», Германия), 95 % влажности и 5 %-ом содержании  $CO_2$ .

### Тест

Для анализа клоногенной активности (выживаемости) клетки после облучения переносили в стерильные чашки Петри с питательной средой, нанося на поверхность с помощью микропипетки 0,1 мл клеточной суспензии и инкубировали в течение 14 дней до формирования колоний, видимых невооруженным глазом (в диаметре не менее 0,75 мм). Расчет фактора изменения дозы (ФИД) проводили по кривым доза-эффект, построенным в полулогарифмических координатах, используя соотношение:

$$\text{ФИД} = D_0(\text{соединение})/D_0(\text{контроль}),$$

где  $D_0$  представляет собой дозу облучения, снижающую выживаемость клеток в  $e$  раз ( $\approx 37\%$  от исходного уровня) на линейном участке кривой.

Для экспоненциальных кривых, характерных для плот-ноизирующего излучения, параметр  $D_0$  определяли как тангенс угла наклона линейного участка, тогда как для кривых с начальным «плечом», наблюдаемых при действии ред-коизирующего излучения, расчет  $D_0$  выполняли только по конечному экспоненциальному участку [20]. Данная методика обеспечивает объективную количественную оценку радиопротекторной эффективности, позволяя стандартизовано сравнивать различные соединения с учетом особенностей кривых выживаемости для разных типов излучения, что соответствует общепринятым радиобиологическим подходам.

### Исследуемые препараты

Исследуемые препараты: фумаровая кислота 400 мкМ (0,05 мг/мл), фумарат 3 гидроксипиридина 200 мкМ (0,04 мг/мл), деанола ацеглумат 1000 мкМ (0,26 мг/мл), цистамин 10 мкМ (0,001 мг/мл). Фумаровая кислота и фумарат 3-гидроксипиридина синтезированы доцентом, к.х.н. Шкавровым Сергеем Владимировичем на базе Центра Биотехнологий ИАТЭ НИЯУ МИФИ (г. Обнинск). Деанола ацеглумат синтезирован на базе Всероссийского научного центра по безопасности биологически активных веществ (г. Старая Купавна). Цистамин был закуплен в компании ООО «РЕАРУС» (производитель «Acros Organics»).

Клетки инкубировали с исследуемыми соединениями (фумаровая кислота фумарат 3 гидроксипиридина, деанола ацеглумат) в течение 24-х часов, основываясь на предварительных исследованиях токсичности методом МТТ-теста. Для цистамина, используемого в качестве референсного соединения, продолжительность инкубации составила 30 минут. Результаты предварительного МТТ-теста продемонстрировали, что цистамин проявляет максимальную радиозащитную активность и минимальную цитотоксичность при 30-минутной предлучевой инкубации. В этих условиях показатель выживаемости клеток достигал 98,3 %. Увеличение времени экспозиции до 3 и 24 часов приводило к прогрессирующему снижению жизнеспособности: до 95,2 % и 68,0 % соответственно, что подтверждает оптимальность выбранного 30-минутного интервала.

### Источники ионизирующего излучения и условия облучения

Облучение проводили в пробирках типа «Эппендорф» (объем 1,5 мл).

Облучение гамма-квантами осуществляли на уникальной научной установке «ГУР-120» НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ в г. Обнинск. Источник гамма-излучения (на основе изотопа  $^{60}Co$ ) калибровали для обеспечения средней энергии 1,25 МэВ, мощность дозы составила 0,9 Гр/мин.

Облучение протонами осуществляли на комплексе протонной терапии «Прометеус» Медицинского радиологического научного центра им. А. Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России в г. Обнинске. Энергия пучка протонов при выходе из выпускного канала составляла 150 МэВ. Облучение проводили перед пиком Брэгга.

Облучение ионами  $^{12}C$  осуществляли на каскаде ускорителя «У-70» НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ в г. Протвино,  $E_{\text{сред}} = 455,8$  МэВ/нуклон). Облучение проводилось за пиком Брэгга.

Дозы облучения составили в дозах 2, 6, 8, 12 Гр. Диапазон доз выбран исходя из того, что такие дозы могут быть применены для лечения опухолевых заболеваний.

Статистическая обработка

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программы Microsoft Excel 2019 (для первичного анализа и визуализации) и Python в среде Jupyter Notebook (для расчётов с применением библиотек SciPy и Pandas). Графики построены в программах Microsoft Excel 2019 и SigmaPlot 11.

Критерий Стьюдента (t-критерий) применен для оценки статистической значимости различий между средними значениями выживаемости клеток в различных сериях опытов. Наблюдаемые различия считали статистически значимыми при уровне значимости  $p < 0,05$ .

Результаты и обсуждение

Настоящее исследование было направлено на сравнительный анализ радиопротекторной эффективности трех соединений (фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумата) в одинаковых условиях, что ранее не проводилось. В отличие от предыдущих работ [16, 21], где изучались соединения отдельно, здесь впервые проведен их прямой сравнительный анализ друг с другом и с эталонным препаратом цистамином на одной клеточной линии, при идентичных дозах облучения и времени инкубации. Ключевой новизной является также оценка защиты не только при действии  $\gamma$ -квантов, но и при действии протонов и ионов углерода, что актуально для радиобиологии адронной терапии. Полученные данные подтверждают и дополняют первоначальные наблюдения.

На рисунке 1 представлен результат действия фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина, деанола ацеглумата и цистамина на выживаемость фибробластов человека, облученных  $\gamma$ -квантами. Кривая 1 описывает действие гамма-квантов на фибробласты человека в дозах 2, 6, 8, 12 Гр (без соединений), кривая 2 – действие ионизирующего излучения на фибробласты, инкубированные с цистамином, кривая 3 отображает действие ионизирующего излучения на клетки человека, инкубированные с фумаратом 3-гидроксипиридина, кривая 4 – действие ионизирующего излучения на фибробласты, инкубированные с фумаровой кислотой, кривая 5 – действие ионизирующего излучения на фибробласты, инкубированные с деанола ацеглуматом.

Как показано на рисунке 1, все исследуемые соединения защищают клетки человека линии Фб-hTERT при облучении гамма-квантами. Для деанола ацеглумата фактор изменения дозы (ФИД) =  $2,15 \pm 0,11$ , для фумаровой кислоты ФИД =  $1,73 \pm 0,09$ , для фумарата 3-гидроксипиридина ФИД =  $1,61 \pm 0,08$  и для цистамина ФИД составил  $1,31 \pm 0,06$ . Наблюдаемое превышение ФИД исследуемых соединений над цистамином *in vitro* объясняется ограничениями механизмов действия цистамина в клеточных культурах. Основу радиопротекторного действия цистамина в условиях *in vitro* составляет его выраженная антиоксидантная активность, реализуемая через три ключевых механизма: нейтрализацию свободных радикалов, снижение окислительного стресса и активацию глутатионовой системы [22, 23]. В целостном организме цистамин дополнительно обеспечивает радиозащитное действие через индукцию умеренной тканевой гипоксии (специфично для *in vivo* условий).

Данные, представленные на рисунке 1, свидетельствуют о значимых радиозащитных свойствах исследуемых соединений по отношению к действию  $\gamma$ -излучения

на нормальные клеточные линии человека *in vitro*. Антиоксидантные свойства исследуемых соединений обуславливают их радиопротекторные эффекты [12, 15]. Данные соединения ингибируют образование свободных радикалов, опосредованное  $\gamma$ -излучением, тем самым прерывая цепные реакции свободнорадикального окисления и предотвращая развитие оксидативного стресса [16].

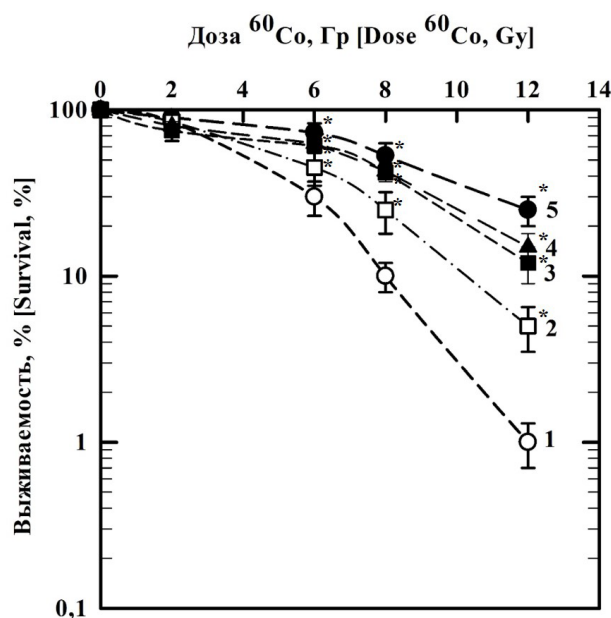


Рис. 1. Влияние фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина, деанола ацеглумата и цистамина на выживаемость фибробластов человека, облученных  $\gamma$ -квантами. Примечание: \* – статистически значимое отличие ( $p < 0,05$ ) от контроля

[Fig. 1. Effect of fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate, deanol aцегlumate, and cystamine on the survival of human fibroblasts exposed to gamma rays. Note: \* – statistically significant difference ( $p < 0,05$ ) from the control group]

Далее представляло интерес проверить наличие или отсутствие селективности исследуемых соединений.

На рисунке 2 представлены результаты действия гамма-квантов на клетки нейробластомы человека (кривая 1) без соединений, кривая 2 отображает действие ионизирующего излучения на клетки, инкубированные с цистамином, кривая 3 – действие гамма-излучения на клетки, инкубированные с фумаратом 3-гидроксипиридина, кривая 4 – действие гамма-излучения на клетки, инкубированные с фумаровой кислотой, кривая 5 – действие гамма-излучения на клетки, инкубированные с деанола ацеглуматом.

Как показано на рисунке 2, фумаровая кислота, фумарат 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумат оказывают защитное действие не только на нормальные клетки, но и на опухолевые, что говорит об отсутствии избирательного радиопротекторного действия исследуемых соединений. Для деанола ацеглумата ФИД =  $1,40 \pm 0,13$ , для фумаровой кислоты ФИД =  $1,27 \pm 0,12$ , для фумарата 3-гидроксипиридина ФИД =  $1,20 \pm 0,08$  и для цистамина  $1,13 \pm 0,09$ .

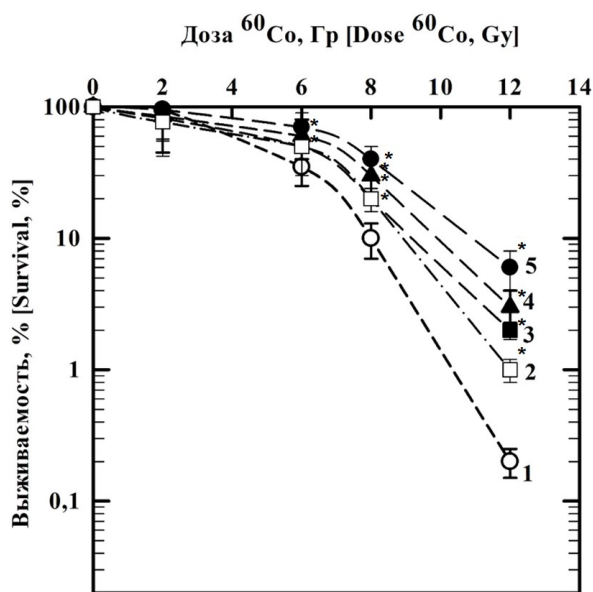


Рис. 2. Влияние фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина, деанола ацеглумата и цистамина на выживаемость клеток нейробластомы человека, облученных  $\gamma$ -квантами. Примечание: \* – статистически значимое отличие ( $p < 0,05$ ) от контроля

[Fig. 2. Effect of fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate, deanol aceglumate, and cystamine on the survival of human neuroblastoma cell exposed to gamma rays. Note: \* – statistically significant difference ( $p < 0,05$ ) from the control group

Ограниченная эффективность исследуемых соединений в опухолевых клетках, по сравнению с нормальными фибробластами, может объясняться несколькими взаимосвязанными факторами. Во-первых, опухолевые клетки характеризуются выраженными нарушениями систем репарации ДНК [24], что принципиально ограничивает потенциал радиозащитных механизмов, направленных на восстановление радиационных повреждений. Во-вторых, измененный метаболизм опухолевых клеток, включая особенности накопления соединений и функционирования антиоксидантных систем, может снижать доступность и эффективность радиопротекторов [25]. В третьих, следует учитывать, что классические радиопротекторы преимущественно защищают нормальные радиочувствительные ткани (костный мозг, кишечный эпителий) за счет специфических механизмов, которые могут быть менее выражены в используемой опухолевой модели. Таким образом, полученные различия отражают не только общие закономерности радиочувствительности, но и специфику биологии конкретных клеточных линий.

Далее были изучены радиозащитные свойства соединений при действии на клетки протонного излучения. Благодаря антиоксидантным свойствам исследуемые соединения теоретически способны защищать здоровые ткани, нейтрализуя вторичные частицы, образующиеся при взаимодействии протонов с веществом, и снижая их вклад в общую дозу. Для моделирования облучения здоровых тканей воздействие проводили перед пиком Брэгга.

Дальнейшее изучение радиопротекторной эффективности соединений проводили на нормальных клеточных линиях как наиболее релевантной модели для оценки защиты здоровых тканей.

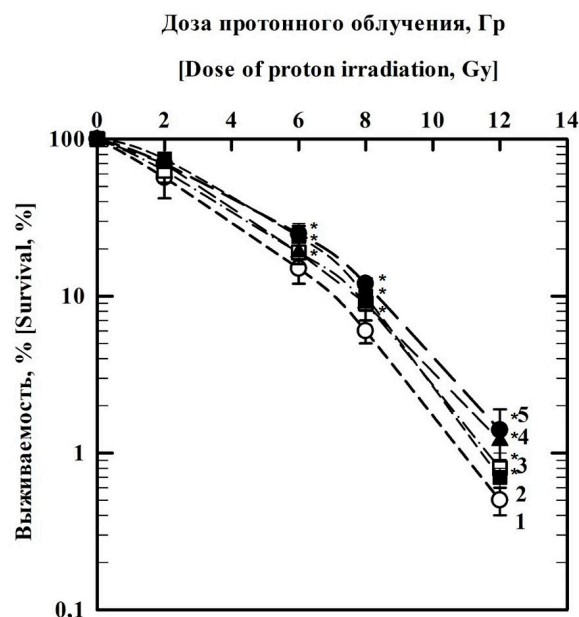


Рис. 3. Влияние фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина, деанола ацеглумата и цистамина на выживаемость фибробластов человека, облученных протонами. Примечание: \* – статистически значимое отличие ( $p < 0,05$ ) от контроля

[Fig. 3. Effect of fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate, deanol aceglumate, and cystamine on the survival of human fibroblasts exposed to protons. Note: \* – statistically significant difference ( $p < 0,05$ ) from the control group]

На рисунке 3 представлены результаты действия протонного излучения на фибробласты человека (кривая 1) без соединений, кривая 2 отображает действие ионизирующего излучения на клетки, инкубированные с цистамином, кривая 3 – действие протонов на клетки, инкубированные с фумаратом 3-гидроксипиридина, кривая 4 – действие протонов на клетки, инкубированные с фумаровой кислотой, кривая 5 – действие протонов на клетки, инкубированные с деанола ацеглуматом.

Как показано на рисунке 3, при действии протонного излучения ФИД для деанола ацеглумата составил  $1,17 \pm 0,06$ , для фумаровой кислоты составил  $1,13 \pm 0,06$ , для фумарата 3-гидроксипиридина  $1,10 \pm 0,05$ , для цистамина  $1,10 \pm 0,04$ . Все соединения демонстрируют дозозависимый радиопротекторный эффект при протонном облучении, особенно выраженный в клинически значимом диапазоне 6–12 Гр. Это обосновывает возможность разработки схем премедикации (за 24 часа до сеанса) для протонной терапии для защиты нормальных тканей.

Снижение защиты фибробластов перед пиком Брэгга объясняется преобладанием быстрых нейтронов среди вторичных частиц протонной терапии. Нейтроны (в отличие от тормозного излучения) распространяются далеко от трека протона и слабо нейтрализуются исследуемыми соединениями, эффективными только против фотонов с косвенным механизмом повреждения.

Представляло интерес исследовать радиопротекторные свойства исследуемых соединений при облучении фибробластов человека другими видами излучения, имеющими относительную биологическую эффективность (ОБЭ) больше, чем гамма-кванты и протоны.

Был проведен сравнительный анализ радиопротекторного действия фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумата с цистамином при действии ионов  $^{12}\text{C}$ . Облучение фибробластов человека проводилось за пиком Брэгга для моделирования ситуации облучения здоровых тканей, находящиеся за опухолью. Теоретически, это представляет большой интерес, так как здоровые клетки, находящиеся за опухолью, то есть за пиком Брэгга, могут быть защищены протекторами от вторичных продуктов ионно-углеродной терапии (например, гамма-квантов, так как, в тоже время, на опухолевые клетки радиопротекторное действие распространяться не будет).

На рисунке 4 представлены результаты действия ионов  $^{12}\text{C}$  на фибробласты человека (кривая 1) без соединений, кривая 2 отображает действие ионизирующего излучения на клетки, инкубированные с цистамином, кривая 3 – действие ионов углерода 12 на клетки, инкубированные с фумаратом 3-гидроксипиридина, кривая 4 – действие ионов углерода 12 на клетки, инкубированные с фумаровой кислотой, кривая 5 – действие ионов углерода-12 на клетки, инкубированные с деанола ацеглуматом.

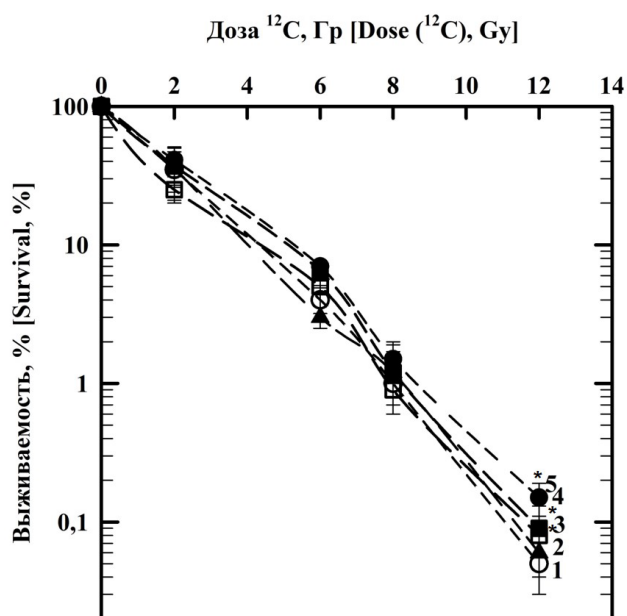


Рис. 4. Влияние фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина, деанола ацеглумата и цистамина на выживаемость фибробластов человека, облученных ионами углерода 12. Примечание: \* – статистически значимое отличие ( $p < 0,05$ ) от контроля

[Fig. 4. Effect of fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate, deanol aceglumate, and cystamine on the survival of human fibroblasts exposed to carbons-12 ions. Note: \* – statistically significant difference ( $p < 0,05$ ) from the control group]

Как показано на рисунке 4, при действии ионов  $^{12}\text{C}$  исследуемые соединения не проявили защитного действия на нормальные клетки человека. ФИД для деанола ацеглумата составил  $1,09 \pm 0,05$ , для фумаровой кислоты –  $1,07 \pm 0,06$ , для фумарата 3-гидроксипиридина –  $1,0 \pm 0,04$ , для цистамина –  $1,00 \pm 0,03$ .

Полученные результаты объясняются тем, что преобладающий вклад в дозу вносят нейтроны, протоны и  $\alpha$ -частицы, при этом  $\gamma$ -кванты практически не вносят вклад

в дозу. Указанные вторичные продукты, как и ионы  $^{12}\text{C}$ , характеризуются высокой ОБЭ, и относятся к плотноионизирующему излучению, которое имеет прямой повреждающий механизм действия.

### Заключение

Исследование выявило значительные различия в радиопротекторной активности деанола ацеглумата, фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и цистамина в зависимости от типа излучения ( $\gamma$ , протоны,  $^{12}\text{C}$ ), причем эффективность защиты коррелирует с физическими характеристиками излучения. Основной механизм радиозащиты – антиоксидантное действие соединений, подавляющих косвенные эффекты облучения через нейтрализацию активных форм кислорода.

Практическое применение фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумата включает снижение лучевой нагрузки на здоровые ткани, в том числе при протонной терапии, включая защиту от вторичных частиц.

Актуальность работы обусловлена поиском соединений-модуляторов радиочувствительности для ключевых областей: клинической онкологии (защита нормальных тканей при лучевой терапии), аэрокосмической медицины (профилактика радиопоражений) и военной сферы (индивидуальные средства защиты).

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

Купцова П.С. – разработка структуры статьи, написание текста, создание графиков, обработка первичных данных.

Комарова Л.Н. – научное руководство исследованием, координация работы, критический анализ и редактирование текста.

Ольховая Е.Р. – планирование экспериментов, проведение радиобиологических экспериментов, методологическое обеспечение.

Лапенко А.К. – техническое выполнение экспериментов, сбор данных, верификация результатов.

Шкавров С.В. – синтез и характеристика исследуемых соединений, обеспечение реагентами.

Купцов И.С. – статистическая обработка данных, построение графиков, математическое моделирование.

Сабуров В.О. – проведение облучения протонами, дозиметрия, включая калибровку детекторов, измерение и расчет поглощенной дозы.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

Публикация не имела финансовой поддержки.

### Литература

- Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Состояние онкологической помощи населению России в 2023 году / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. Москва: МНИОИ им. П.А. Герцена - филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. 262 с.
- Ferlay J., Colombet M., Soerjomataram I. et al. Cancer statistics for the year 2020: An overview // International Journal of Cancer. 2021. Vol. 149, No. 4. P. 778–789. DOI: 10.1002/ijc.33588.
- Gardner S.J., Kim J., Chetty I.J. Modern Radiation Therapy Planning and Delivery // Hematology/Oncology Clinics of

- North America. 2019. Vol. 33, No. 6. P. 947-962. DOI: 10.1016/j.hoc.2019.08.005.
4. Johnson D., Chen Y., Ahmad S. Dose and linear energy transfer distributions of primary and secondary particles in carbon ion radiation therapy: A Monte Carlo simulation study in water // *Journal of medical physics*. 2015. Vol. 40, No. 4. P. 214–219. DOI: 10.4103/0971-6203.170785.
  5. Гребенюк А.Н., Легеза В.И., Миляев А.В. и др. Современная стратегия защитных и медицинских мероприятий при радиационных авариях // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 4. С. 80-88.
  6. Mun G. I., Kim S., Choi M. et al. Pharmacology of natural radioprotectors // *Archives of Pharmacol Research*. 2018. Vol. 16, № 11. P. 1033-1050.
  7. Abdollahi H., Shiri I., Atashzar M. et al. Radiation protection and secondary cancer prevention using biological radioprotectors in radiotherapy // *International Journal of Cancer Therapy and Oncology*. 2015. Vol. 29. URL: <https://doi.org/10.20935/AcadNano7267> (Дата обращения: 24.11.2024).
  8. Shivappa P., Bernhardt G.V. Natural Radioprotectors on Current and Future Perspectives: A Mini-Review // *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*. 2022. Vol. 14. P. 57-71.
  9. Joiner M., Kogel van der. *Basic Clinical Radiobiology*. 4th ed. London: Hodder Arnold, 2009. 375 p.
  10. Radioprotectors.org: an open database of known and predicted radioprotectors. URL: <https://radioprotectors.org/home> (Дата обращения: 13.11.2024).
  11. Ilica R.A., Kloetzer L., Galaction A.I., Cașcaval D. Fumaric acid: production and separation // *Biotechnology letters*. 2019. Vol. 41, No. 1. P. 47–57. DOI: 10.1007/s10529-018-2628-y.
  12. Wipke B.T., Hoepner R., Strassburger-Krogias K. et al. Different Fumaric Acid Esters Elicit Distinct Pharmacologic Responses // *Neurology(R) neuroimmunology & neuroinflammation*. 2021. Vol. 8, No. 2. DOI: 10.1212/NXI.0000000000000950.
  13. Volc-Platzer B. Fumaric acid esters for paediatric psoriasis // *The British journal of dermatology*. 2021. Vol. 185, No. 1. P. 5–6. DOI: 10.1111/bjd.20057.
  14. Коршунова А.Б., Костычев Н.А., Инчина В.И., Чаиркин И.Н. Перспективы фармакологической коррекции острой ишемии головного мозга // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2009. Т. 11, № 1. С. 1287-1290.
  15. Сайт «Соль 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина с фумаровой кислотой, обладающая метаболической и кардиопротекторной активностью, и способ ее получения». URL: <https://patents.google.com/patent/RU2365582C1/ru> (Дата обращения: 19.06.2025).
  16. Выпова Е. Р., Купцова П.С., Комарова Л.Н. и др. Исследование возможных радиопротекторных свойств деанола ацеглумата при действии ионизирующего излучения на клетки человека // *Радиация и риск (Бюллетень НРЭР)*. 2023. Т. 32, № 3. С. 38-49.
  17. Носков Д.С., Поройков В.В., Ших Е.В. и др. Деанола ацеглумат (нооклерин): клинико-фармакологические аспекты и актуальность применения в лечебной практике // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2013. № 113. С. 97-99.
  18. Чутко Л.С., Сурушкина С.Ю., Никишена И.С. и др. Применение деанола ацеглумата при лечении неврастении у подростков со школьной дезадаптацией // *Вопросы современной педиатрии*. 2013. Т. 12, № 5. С. 99-103.
  19. Прилепский А.Ю., Дроздов А.С., Богатырев В.А., Староверов С.А. Методы работы с клеточными культурами и определение токсичности наноматериалов. СПб: Университет ИТМО, 2019. 43 с.
  20. Храменкова О.М. Основы радиобиологии: учебное пособие для студентов биологических специальностей высших учебных заведений. Гомель: УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2003. 238 с.
  21. Купцова П.С., Комарова Л.Н., Выпова Е.Р. Исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии ионизирующего излучения на клетки человека // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 1. С. 32-39.
  22. Penabei S., Meesungnoen J., Jay-Gerin J.-P. Assessment of Cystamine's Radioprotective Antioxidant Ability under High-Dose-Rate Irradiation: A Monte Carlo Multi-Track Chemistry Simulation Study // *Antioxidants*. 2023. Vol. 12. P. 77-89.
  23. Thoene J., Gavin R.F., Towne A. et al. In vitro activity of cysteamine against SARS-CoV-2 variants // *Molecular Genetics and Metabolism*. 2022. Vol. 137, № 1-2. P. 192–200.
  24. Baumann M., Krause M., Overgaard J. et al. Radiation oncology in the era of precision medicine // *Nature Reviews Cancer*. 2008. Vol. 16, № 4. P. 234-249.
  25. Vander Heiden M.G., Cantley L.C., Thompson C.B. Understanding the Warburg effect: the metabolic requirements of cell proliferation // *Science*. 2009. Vol. 324, № 5930. P. 1029-1033.

Поступила: 08.07.2025

**Купцова Полина Сергеевна** – старший преподаватель Отделения биотехнологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». **Адрес для переписки:** 249039, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», город Обнинск, тер. Студгородок, д. 1; E-mail: [kuptsova\\_apollinaria@mail.ru](mailto:kuptsova_apollinaria@mail.ru)

ORCID: 0000-0003-1298-920X

**Комарова Людмила Николаевна** – доктор биологических наук, профессор Отделения биотехнологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

ORCID: 0000-0003-0491-4486

**Ольховая Елена Романовна** – заведующая учебно-научной лабораторией Отделения биотехнологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

ORCID: 0000-0002-8055-9239

**Лапенко Алина Константиновна** – специалист по учебно-методической работе Отделения биотехнологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

ORCID: 0009-0001-5738-8478

**Шкавров Сергей Владимирович** – кандидат химических наук, заместитель начальника Фармацевтического центра практического обучения и компетенций, доцент Отделения биотехнологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

ORCID: 0009-0009-0572-9427

**Купцов Илья Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и специальной физики, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

ORCID: 0000-0002-9891-6740

**Сабуров Вячеслав Олегович** – заведующий лабораторией разработки и эксплуатации облучающей техники, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

ORCID: 0000-0002-6907-2753

**Для цитирования:** Купцова П.С., Комарова Л.Н., Ольховая Е.Р., Лапенко А.К., Шкавров С.В., Купцов И.С., Сабуров В.О. Оценка радиопротекторного потенциала фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумата при действии  $\gamma$ -излучения, протонов и ионов  $^{12}\text{C}$  на клетки человека // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 63–71. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-63-71

## Evaluation of the radioprotective potential of fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate and deanol aceglumate under the action of $\gamma$ -radiation, protons and $^{12}\text{C}$ ions on human cells

Polina S. Kuptsova<sup>1</sup>, Lyudmila N. Komarova<sup>1</sup>, Elena R. Olkhovaya<sup>1</sup>, Alina K. Lapenko<sup>1</sup>, Sergey V. Shkavrov<sup>1</sup>, Ilya S. Kuptsov<sup>1</sup>, Vyacheslav O. Saburov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia

<sup>2</sup> A. Tsyb National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

*The relevance of the research of new radioprotectors is due to the need to protect healthy tissues during radiation therapy. Existing drugs have serious side effects, which requires the search for safer and more effective analogues. The aim of the work is a comparative analysis of the radioprotective efficacy of three promising compounds – fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate and deanol aceglumate in vitro. Tasks: to determine non-toxic concentrations of compounds, to evaluate their protective effect under different types of radiation (gamma quanta, protons,  $^{12}\text{C}$  ions), to compare the effect on normal (fibroblasts Fb-hTERT) and tumor (neuroblastoma SK-N-BE(2)) cells. Materials and Methods: the study was conducted on cultures of cells under the influence of ionizing radiation of different quality: gamma quanta ( $^{60}\text{Co}$ ), protons and accelerated  $^{12}\text{C}$  ions. Optimal concentrations have been established: fumaric acid – 400  $\mu\text{mol}$ , 3-hydroxypyridine fumarate – 200  $\mu\text{mol}$ , deanol aceglumate – 1000  $\mu\text{mol}$ . Incubation time is 24 hours. Results and Discussion: It was shown that all compounds showed a significant radioprotective effect on gamma radiation (1-12 Gy) for fibroblasts; the protective effect was also observed on tumor cells. There was no radioprotective effect when irradiated with protons and  $^{12}\text{C}$  ions. Deanol aceglumate has demonstrated the greatest effectiveness. Conclusion: The study confirmed the prospects of deanol aceglumate and other compounds as radioprotectors under gamma irradiation. Their use can reduce damage to healthy tissues during radiation therapy. However, no protective effect has been detected for protons and heavy ions, which requires further study.*

**Key words:** radioprotectors, gamma radiation,  $^{12}\text{C}$  ions, protons, fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate, deanol aceglumate.

### Authors' personal contribution

Polina S. Kuptsova – development of the structure of the article, writing the text, creating graphs, processing primary data.

Lyudmila N. Komarova – scientific management of research, coordination of work, critical analysis and text editing.

Elena R. Olkhovaya – experiment planning, conducting radiobiological experiments, methodological support.

Alina K. Lapenko – technical execution of experiments, data collection, verification of results.

Sergey V. Shkavrov – synthesis and characterization of the studied compounds, provision of reagents.

**Polina S. Kuptsova**

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering

**Address for correspondence:** 1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga Region, 249040, Russia; Email: kuptsova\_apollinaria@mail.ru

Ilya S. Kuptsov – statistical data processing, plotting, mathematical modeling.

Vyacheslav O. Saburov – carrying out proton irradiation, dosimetry, including calibration of detectors, measurement and calculation of absorbed dose.

### Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

### Sources of funding

The study was not financially supported.

### References

- Kaprin AD, Starinsky WV, Shakhzadova AO. State of cancer care for the population of Russia in 2023. Moscow: P.A. Herzen Moscow Oncology Research Institute – Branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation; 2024. 262 p. (In Russian).
- Ferlay J, Colombet M, Soerjomataram I, Parkin DM, Piñeros M, Znaor A, et al. Cancer statistics for the year 2020: An overview. *International journal of cancer*. 2021;149(4): 778-789. DOI: 10.1002/ijc.33588.
- Gardner SJ, Kim J, Chetty IJ. Modern Radiation Therapy Planning and Delivery. *Hematology/Oncology Clinics of North America*. 2019;33(6): 947-62. DOI: 10.1016/j.hoc.2019.08.005.
- Johnson D, Chen Y, Ahmad S. Dose and linear energy transfer distributions of primary and secondary particles in carbon ion radiation therapy: A Monte Carlo simulation study in water. *Journal of Medical Physics*. 2015;40(4): 214-219. DOI: 10.4103/0971-6203.170785.
- Grebenyuk AN, Legeza VI, Milyaev AV, Starkov AV. Modern strategy of health protection and medical measures in radiation accidents. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(4): 80-88. (In Russian).
- Mun GI, Kim S, Choi M, Kim CS, Lee YS. Pharmacology of natural radioprotectors. *Archives of pharmacol research*. 2018;41(11): 1033-1050.
- Abdollahi H, Shiri I, Atashzar M, Sarebani M, Moloudi K, Samadian H. Radiation protection and secondary cancer prevention using biological radioprotectors in radiotherapy. *International Journal of Cancer Therapy and Oncology*. 2015;3(1). Available from: <https://doi.org/10.20935/AcadNa no7267> [Accessed 24 Nov 2024].
- Shivappa P, Bernhardt GV. Natural Radioprotectors on Current and Future Perspectives: A Mini-Review. *Journal of pharmacy & bioallied sciences*. 2022;14(1): 57-71.
- Joiner M, van der Kogel A. Basic Clinical Radiobiology. 4th ed. London: Hodder Arnold; 2009. 375 p.
- Radioprotectors.org: an open database of known and predicted radioprotectors. Available from: <https://radioprotectors.org/home> [Accessed 13 Nov 2024].
- Ilica RA, Kloetzer L, Galaction AI, Cașcaval D. Fumaric acid: production and separation. *Biotechnology Letters*. 2019;41(1): 47-57. DOI: 10.1007/s10529-018-2628-y.
- Wipke BT, Hoepner R, Strassburger-Krogias K, Thomas AM, Gianni D, Szak S, et al. Different Fumaric Acid Esters Elicit Distinct Pharmacologic Responses. *Neurology(R) neuroimmunology & neuroinflammation*. 2021;8(2): e950. DOI: 10.1212/NXI.0000000000000950.
- Volc-Platzer B. Fumaric acid esters for paediatric psoriasis. *British Journal of Dermatology*. 2021;185(1): 5-6. DOI: 10.1111/bjd.20057.
- Korshunova AB, Kostychev NA, Inchina VI, Chairkin IN. Prospects for pharmacological correction of acute cerebral ischemia. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2009;11(1): 1287-1290. (In Russian).
- Salt of 2-ethyl-6-methyl-3-hydroxypyridine with fumaric acid, possessing metabolic and cardioprotective activity, and method for its preparation Available from: <https://patents.google.com/patent/RU2365582C1/ru> [Accessed 19 Jun 2025]. (In Russian).
- Vypova ER, Kuptsova PS, Komarova LN, Berseneva AA, Baldov DA, Kotlyarov AA. Study of possible radioprotective properties of deanol aceglumate under the action of ionizing radiation on human cells. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2023;32(3): 38-49. (In Russian).
- Noskov DS, Poroikov VV, Shikh EV, Iasnetsov VV. Deanol aceglumate (Nooclerin): clinical and pharmacological aspects and relevance of use in medical practice. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2013;113: 97-99. (In Russian).
- Chutko LS, Surushkina SYu, Nikishena IS, Yakovenko EA, Anisimova TI. The use of deanol aceglumate in the treatment of neurasthenia in adolescents with school maladjustment. *Voprosy sovremennoy pediatrii = Problems of Modern Pediatrics*. 2013;12(5): 99-103. (In Russian).
- Prilepskiy AYU, Drozdov AS, Bogatyrev VA, Staroverov SA. Methods of working with cell cultures and determining the toxicity of nanomaterials. Saint Petersburg: ITMO University; 2019. 43 p. (In Russian).
- Khranchenkova OM. Fundamentals of Radiobiology: a textbook for students of biological specialties of higher educational institutions. Gomel: Educational Institution «GSU named after. F. Skorina»; 2003. 238 p. (In Russian).
- Kuptsova PS, Komarova LN, Vypova ER. Study of radioprotective properties of fumaric acid and 3-oxypyridine fumarate under the action of ionizing radiation on human cells. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 32-39. (In Russian).
- Penabei S, Meesungnoen J, Jay-Gerin JP. Assessment of Cystamine's Radioprotective Antioxidant Ability under High-Dose-Rate Irradiation: A Monte Carlo Multi-Track Chemistry Simulation Study. *Antioxidants (Basel)*. 2023;12(1): 77. DOI: 10.3390/antiox12010077.
- Thoene J, Gavin RF, Towne A, Wattay L, Ferrari MG, Navarrete J, et al. In vitro activity of cysteamine against SARS-CoV-2 variants. *Molecular Genetics and Metabolism*. 2022;137(1-2): 192-200. DOI: 10.1016/j.ymgme.2022.08.005.
- Baumann M, Krause M, Overgaard J, Debus J, Bentzen SM, Daartz J, et al. Radiation oncology in the era of precision medicine. *Nature reviews. Cancer*. 2016;16(4): 234-249. DOI: 10.1038/nrc.2016.18.
- Vander Heiden MG, Cantley LC, Thompson CB. Understanding the Warburg effect: the metabolic requirements of cell proliferation. *Science*. 2009;324(5930): 1029-1033. DOI: 10.1126/science.1160809.

Received: July 08, 2025

**For correspondence: Polina S. Kuptsova** – Senior Lecturer at the Department of Biotechnology, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering – Branch of the National Research Nuclear University “MEPhI” (1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga Region, 249040, Russia; Email: kuptsova\_apollinaria@mail.ru)

ORCID: 0000-0003-1298-920X

**Lyudmila N. Komarova** – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering – Branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Obninsk, Russia

ORCID: 0000-0003-0491-4486

**Elena R. Olkhovaya** – Head of the Educational and Scientific Laboratory of the Department of Biotechnology, Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering – Branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Obninsk, Russia

ORCID: 0000-0002-8055-9239

**Alina K. Lapenko** – Specialist in Educational and Methodological Work of the Department of Biotechnology, Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering – Branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Obninsk, Russia

ORCID: 0009-0001-5738-8478

**Sergey V. Shkavrov** – Candidate of Chemical Sciences, Deputy Head of the Pharmaceutical Center for Practical Training and Competencies, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering – Branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Obninsk, Russia

ORCID: 0009-0009-0572-9427

**Ilya S. Kuptsov** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Special Physics, Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering – Branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Obninsk, Russia

ORCID: 0000-0002-9891-6740

**Vyacheslav O. Saburov** – Head of the Laboratory for Development and Operation of Irradiation Equipment, A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Center of Radiology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

ORCID: 0000-0002-6907-2753

**For citation: Kuptsova P.S., Komarova L.N., Olkhovaya E.R., Lapenko A.K., Shkavrov S.V., Kuptsov I.S., Saburov V.O. Evaluation of the radioprotective potential of fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate and deanol aceglumate under the action of  $\gamma$ -radiation, protons and  $^{12}\text{C}$  ions on human cells. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 63–71. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-63-71**

## Оценка влияния средств индивидуальной защиты на работу программ автоматической модуляции силы тока и напряжения при проведении компьютерной томографии

Шацкий И.Г.<sup>1</sup>, Дружинина П.С.<sup>1</sup>, Чипига Л.А.<sup>1,2,3</sup>, Алексеева Д.В.<sup>3</sup>

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

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

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

*Актуальность данного исследования заключается в необходимости пересмотра устоявшихся подходов к применению средств индивидуальной защиты в компьютерной томографии в связи с широким внедрением алгоритмов автоматической модуляции тока и напряжения. Поскольку средства индивидуальной защиты могут исказить входные данные для этих алгоритмов, их использование способно не только не снизить, но и неоправданно увеличить лучевую нагрузку на пациента, что требует детальной экспериментальной проверки, особенно в педиатрической практике, где пациенты наиболее чувствительны к воздействию ионизирующего излучения. Цель работы – оценить влияние средств индивидуальной защиты на работу программ автоматической модуляции силы тока и напряжения (CareDose 4D и Care kV) при проведении компьютерной томографии на аппарате Somatom Force (Siemens) на примере антропоморфного фантома пятилетнего ребенка. Материалы и методы: Исследование проводилось на базе КТ-отделения Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова с использованием антропоморфного фантома пятилетнего ребенка и технически исправного томографа Somatom Force (Siemens). Для оценки влияния средств индивидуальной защиты на работу программ автоматической модуляции тока и напряжения (CareDose 4D и Care kV) была выполнена серия сканирований фантома с различными вариантами позиционирования защитного фартука и без него, имитирующими реальную клиническую практику. Результаты исследования и обсуждение: Результаты показали, что попадание свинцового фартука в область топограммы интерпретируется системой как увеличение размеров и плотности тела пациента, что автоматически повышает параметры облучения по сравнению со сканированием без свинцового фартука. Заключение: Оценка влияния данного эффекта на поглощенные и эффективные дозы требует дополнительных исследований для определения целесообразности использования средств индивидуальной защиты в компьютерной томографии.*

**Ключевые слова:** компьютерная томография, пациент, радиационная защита, средства индивидуальной защиты, защитный фартук, модуляция силы тока.

### Введение

На протяжении десятилетий использование средств индивидуальной защиты (СИЗ) пациентов для экранирования отдельных анатомических областей считалось одним из самых действенных способов радиационной защиты [1]. В последнее время появляются международные публикации, которые ставят этот постулат под сомнение или прямо опровергают его [2]. Применение СИЗ при компьютерной томографии (КТ) заслуживает внимания не только из-за вращающегося рентгеновского пучка, но также из-за применения в современных установках алгоритмов работы программ автоматической модуляции силы тока и напряжения рентгеновской трубки (AMCT) [3–9]. Средства индивидуальной защиты пациентов могут

исказить данные о размерах и плотности тела пациента для программ AMCT, что приводит к тому, что работа алгоритмов строится на изначально ложных вводных данных. В результате чего модуляция силы тока и напряжения не будет соответствовать реальным размерам тела пациента и, следовательно, может приводить к излишнему увеличению дозы облучения и/или низкому качеству изображения.

Алгоритмы работы программ AMCT CareDose 4D и Care kV КТ-аппаратов модели Somatom Force (Siemens) имеют определенные особенности [10, 11]. КТ-аппарат оснащён программами CareDose 4D и Care kV. Особенностью работы данных программ является автоматическая модуляция силы тока и напряжения рентгеновской трубки во время КТ-сканирования по результатам предварительно выполненной

**Шацкий Илья Геннадьевич**

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: i.shatskiy@niirg.ru

топограммы [12]. Топограмма – это планарное изображение с низкой дозой облучения, которое используется для определения начального и конечного положения сканирования. В CareDose 4D топограмма используется для определения коэффициентов кратности ослабления рентгеновского излучения, проходящего сквозь тело пациента. При этом требуется проведение только одной топограммы в передне-задней или боковой проекции.

Адаптация тока трубки в программе CareDose 4D основана на заданном пользователем вручную (или производителем по умолчанию) эталонного значения (качества) в единицах эффективных мАс (effective mAs – Eff.mAs) и обозначается QRM (Quality Reference mAs). QRM – это такое значение эффективных мАс, которые обеспечивают желаемое качество изображения для пациентов стандартного телосложения разных возрастных групп. Для каждого протокола во внутренней памяти КТ-аппарата хранится типичное значение ослабления рентгеновского излучения для стандартного пациента и значение QRM соотносится с этим референтным ослаблением рентгеновского излучения. Параметр Eff.mAs равен фактическому произведению тока трубки на время (мАс), деленному на пич, и определяется системой прогностически в соответствии с выбранным значением QRM, выполненной топограммой и выбранным протоколом сканирования. Во время сканирования ток трубки (и, следовательно, Eff.mAs) автоматически регулируется для компенсации изменений в размерах тела пациента и ослаблении рентгеновского излучения, тем самым обеспечивая такое качество изображения, которое соответствует заданному уровню QRM для стандартного пациента, но подходящее как для пациентов с меньшим, так и для пациентов с большим размером тела.

Вопрос влияния СИЗ на работу программ АМСТ в отечественной практике не рассматривался и требует подробного изучения, в том числе для того, чтобы оценить необходимость введения изменения подходов к использованию СИЗ в отечественные нормативно-методические документы.

Важность данного вопроса становится особенно актуальной при рассмотрении педиатрической практики, где даже незначительное искажение входных данных способно привести к значительному увеличению эффективных доз и рисков радиационных последствий. Свинцовый фартук, который может быть принят системой за часть тела пациента, для компактного детского фантома создает пропорционально более значимое искажение контура и кажущейся «плотности» на топограмме по сравнению со взрослым. Это может привести к неоправданно большому, автоматически рассчитанному системой, увеличению силы тока и напряжения, что потенциально сводит на нет защитный эффект фартука и приводит к необоснованному росту дозы облучения у наиболее уязвимой группы пациентов. Таким образом, исследование на детском фантоме наиболее репрезентативно и критично для выявления и демонстрации негативного эффекта от неправильного использования средств индивидуальной защиты в сочетании с системами АМСТ.

**Цель исследования** – оценить влияние средств индивидуальной защиты на работу программ АМСТ CareDose 4D и Care kV при проведении КТ на аппарате Somatom Force (Siemens) на примере антропоморфного фантома пятилетнего ребенка.

## Материалы и методы

### Антропоморфный фантом

Исследование было проведено на базе КТ-отделения ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России с помо-

щью антропоморфного гетерогенного фантома, представляющего 5-летнего ребенка ростом 109 см и массой тела 19 кг [13–14]. Имитация мягких тканей в таком фантоме выполнена из тканезквивалентного пластика с эффективным атомным номером 7,3 и плотностью 0,985 г см<sup>-3</sup>, легочная ткань выполнена из того же, но вспененного материала с плотностью 0,34–0,38 г см<sup>-3</sup>. Антропоморфный гетерогенный фантом 5-летнего ребенка состоит из аксиальных срезов толщиной 25 мм.

### Протокол сканирования

Сканирование фантома проводилось на технически исправном томографе Somatom Force (Siemens, Германия) с различными вариантами позиционирования защитного фартука. Сканирование проводилось на стандартном КТ-протоколе грудной клетки для 5-летних детей, который используется для диагностики в данном КТ-отделении. Для изучения особенностей работы программ CareDose 4D и Care kV была проведена серия одиночных сканирований фантома с использованием и без использования СИЗ. Варианты позиционирования защитного фартука, которые использовались в эксперименте, подробно описаны в таблице 1. Данные варианты использования защитного фартука соответствуют возможным вариантам использования защитного фартука в текущей медицинской практике.

В исследовании использовался защитный фартук РЕНЕКС ФРОс-0,5 со свинцовым эквивалентом 0,5 мм.

Перед каждым сканированием фантома проводилось его центрирование в гентри. На консоли КТ-аппарата перед началом сканирования в настройках протокола отображался только параметр Eff.mAs. (рис. 1). Он может быть больше или меньше заданного значения QRM. После сканирования это значение обновляется до фактического среднего Eff.mAs, использованного для сканирования. Фактический средний Eff.mAs может незначительно отличаться от расчетного среднего Eff.mAs, который отображается до сканирования, поскольку программа CareDose 4D обновляет расчетные значения до сканирования более точными значениями, определенными во время фактического сканирования [12, 15].

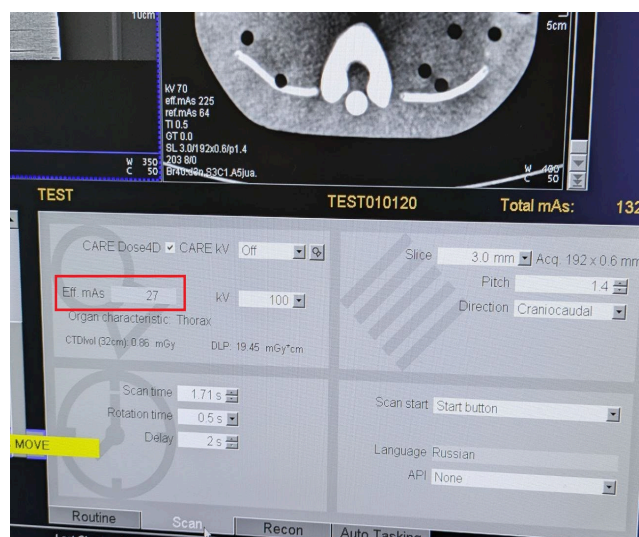
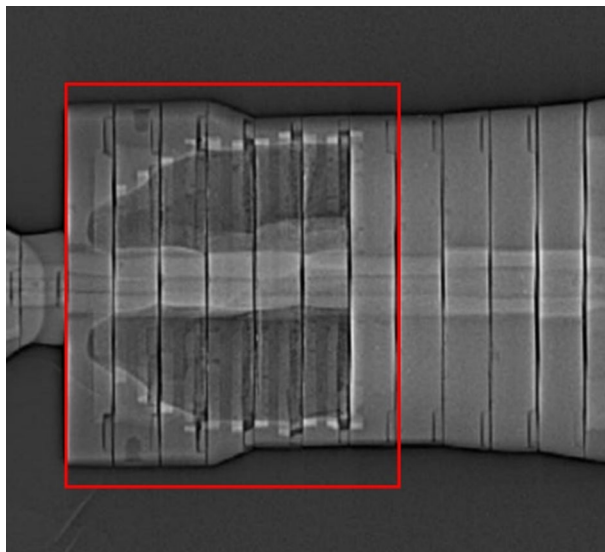
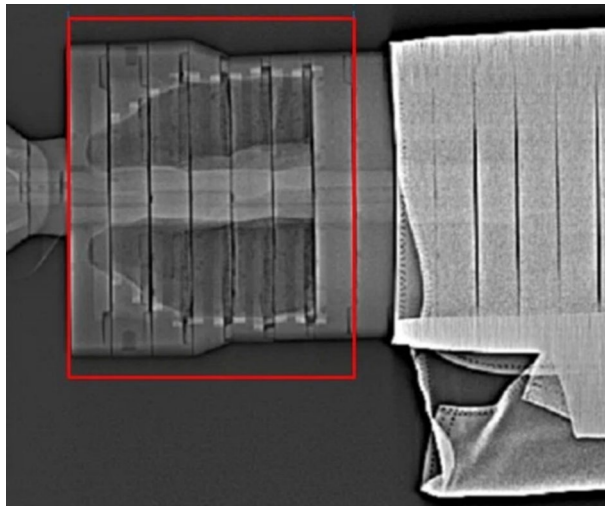
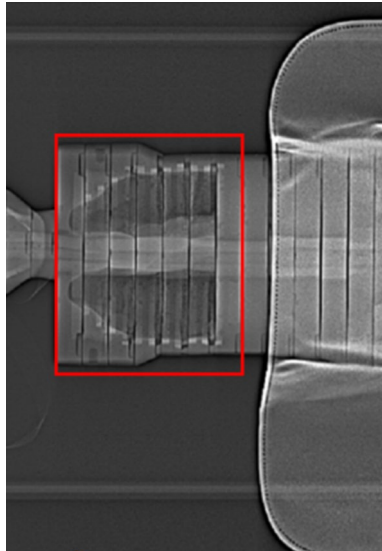


Рис. 1. После проведения топограммы на консоли КТ-аппарата отображается расчетный средний Eff.mAs, который используется во время сканирования

[Fig. 1. After performing the topogram, the calculated average Eff.mAs, which is used during the scan, is displayed on the CT scanner console]

Таблица 1. Варианты позиционирования защитного фартука в эксперименте  
 [Table 1. Protective apron positioning options used in the experiment]

Вариант 1 (эталон) [Option 1 (reference)]	Вариант 2 [Option 2]	Вариант 3 [Option 3]
		
<p>– Сканирование грудной клетки фантома без использования СИЗ [Scanning of the phantom's chest without using PPE]</p>	<p>– Сканирование грудной клетки фантома [Scanning of the phantom's chest];</p> <p>– СИЗ обернут вокруг тела фантома и закрывает область ниже 16 среза (брошная полость, таз, нижние конечности) [PPE is wrapped around the phantom's body, covering the area below the 16th slice (abdominal cavity, pelvis, lower extremities)];</p> <p>– СИЗ не попадает в область сканирования [PPE is not within the scan area].</p>	<p>– Сканирование грудной клетки фантома [Scanning of the phantom's chest];</p> <p>– СИЗ лежит сверху на фантоме и закрывает область ниже 16 среза (брошная полость, таз, нижние конечности) [PPE is placed on top of the phantom, covering the area below the 16th slice (abdominal cavity, pelvis, lower extremities)];</p> <p>– СИЗ не попадает в область сканирования [PPE is not within the scan area].</p>

Эталонным сканированием было принято сканирование без защитного фартука (вариант 1).

Для определения оптимальных параметров сканирования фантома, с дальнейшей целью изучения влияния СИЗ на уровни поглощенных доз в органах, были изучены графики изменения тока рентгеновской трубки при различных вариантах работы программ автоматической модуляции силы тока трубки и напряжения (Care Dose 4D и Care kV).

Некоторые комбинации параметров программы АМСТ не позволяют проводить сканирование так, чтобы обеспечить воспроизводимые условия облучения. Однако для измерения поглощенных доз и определения влияния СИЗ

на поглощенные дозы необходимо обеспечить наиболее схожие условия облучения. Таким образом, на первом этапе работы были проведены предварительные сканирования фантома с использованием различных комбинаций параметров программы АМСТ, т.е. различные комбинации включения и выключения программ Care Dose 4D и Care kV. Любые изменения в работе программ АМСТ сравнивались и анализировались относительно эталонного сканирования. По результатам сканирований были построены графики изменения силы тока трубки в области сканирования. Параметры этих сканирований представлены в таблицах 2–4.

Таблица 2. Параметры сканирования фантома-вариант 1

[Table 2. Phantom scan parameters — Option 1]

№	Набор параметров 1 [Parameter Set 1]	Набор параметров 2 [Parameter Set 2]	Набор параметров 3 [Parameter Set 3]	Набор параметров 4 [Parameter Set 4]	Набор параметров 5 [Parameter Set 5]
Напряжение, кВ Care kV – вкл.(+)/выкл.(-) [Tube voltage, kV Care kV – ON (+)/OFF (-)]	70 +	70 -	70 -	100 +	120 +
CareDose 4D – вкл.(+)/выкл.(-) [CareDose 4D – ON (+)/OFF (-)]	+	-	-	+	+
Значение расчетного параметра Eff.mAs после топограммы [Calculated Eff. mAs value after topogram]	34	10	34*	13	15
Время оборота трубки, с [Tube rotation time, s]			0,5		
Толщина среза, мм Коллимация, мм [Slice thickness, mm Collimation, mm]			3 192 x 0,6		
Питч [Pitch]			1,4		
Длина сканирования, мм [Scan length, mm]			175		
Высота стола, мм [Table height, mm]			100		

\* Значение Eff. mAs установлено оператором вручную, так как автоматика в первом наборе использовала Eff. mAs – 34 [The Eff. mAs value was set manually by the operator, as the automatic system in the first series used an Eff. mAs of 34].

Таблица 3. Параметры сканирования фантома - вариант 2

[Table 3. Phantom scan parameters — Option 2]

№	Набор параметров 1 [Parameter Set 1]	Набор параметров 2 [Parameter Set 2]	Набор параметров 3 [Parameter Set 3]	Набор параметров 4 [Parameter Set 3]
Напряжение, кВ Care kV – вкл.(+)/выкл.(-) [Tube voltage, kV Care kV – ON (+)/OFF (-)]	70 -	80 +	80 -	100 -
CareDose 4D – вкл.(+)/выкл.(-) [CareDose 4D – ON (+)/OFF (-)]	+	+	+	+
Значение расчетного параметра Eff.mAs после топограммы [Calculated Eff. mAs value after topogram]	23	54	25	27

№	Набор параметров 1 [Parameter Set 1]	Набор параметров 2 [Parameter Set 2]	Набор параметров 3 [Parameter Set 3]	Набор параметров 4 [Parameter Set 3]
Время оборота трубки, с [Tube rotation time, s]			0,5	
Толщина среза, мм Коллимация, мм [Slice thickness, mm Collimation, mm]			3 192 x 0,6	
Питч [Pitch]			1,4	
Длина сканирования, мм [Scan length, mm]			175	
Высота стола, мм [Table height, mm]			100	

Таблица 4. Параметры сканирования фантома - вариант 3  
[Table 4. Phantom scan parameters — Option 3]

№	Набор параметров 1 [Parameter Set 1]	Набор параметров 2 [Parameter Set 2]	Набор параметров 3 [Parameter Set 3]	Набор параметров 4 [Parameter Set 4]
Напряжение, кВ Care kV – вкл.(+)/выкл.(-) [Tube voltage, kV Care kV – ON (+)/OFF (-)]	70 -	100 +	100 -	80 -
CareDose 4D – вкл.(+)/выкл.(-) [CareDose 4D – ON (+)/OFF (-)]	+	+	+	+
Значение расчетного параметра Eff. mAs после топограммы [Calculated Eff. mAs value after topogram]	65	83	69	67
Время оборота трубки, с [Tube rotation time, s]			0,5	
Толщина среза, мм Коллимация, мм [Slice thickness, mm Collimation, mm]			3 192 x 0,6	
Питч [Pitch]			1,4	
Длина сканирования, мм [Scan length, mm]			175	
Высота стола, мм [Table height, mm]			100	

Верификация значения объемного КТ-индекса дозы (CTDI<sub>vol</sub>) происходила следующим образом: значение CTDI<sub>vol</sub>, отображаемое на консоли томографа, сравнивалось с результатом измерения в дозиметрическом КТ фантоме диаметром 320 мм, полученном при сканировании на том же протоколе грудной клетки, который использовался при сканировании антропоморфного гетерогенного фантома. Результаты сравнения не превышали допустимые значения нормированных отклонений в 20 %.

### Результаты

Графики изменения тока рентгеновской трубки, полученные при сканировании фантома 5-летнего ребенка при использовании параметров сканирования, указанных в таблицах 2–4, представлены в таблицах 5–7 соответственно.

Таблица 5. Графики изменения тока рентгеновской трубки, полученные при сканировании фантома 5-летнего ребенка (вариант 1) при использовании параметров сканирования, представленных в таблице 2

Table 5. Graphs of the tube current variation obtained during the scanning of the 5-year-old child phantom (Option 1) using the scan parameters presented in Table 2

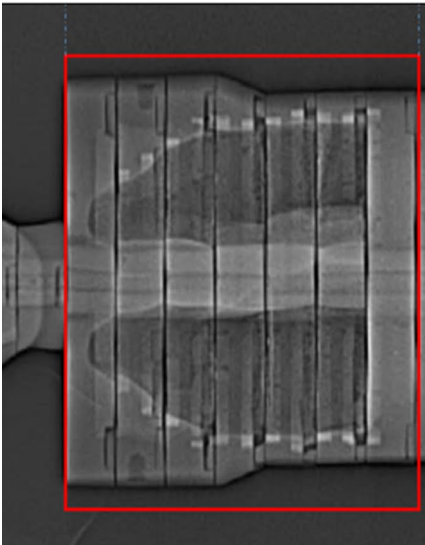

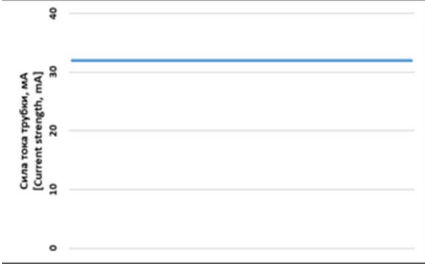
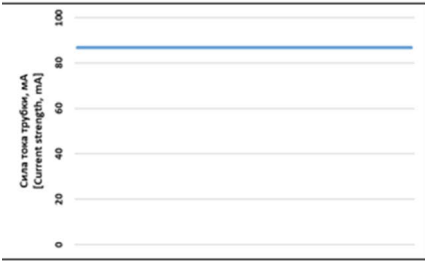
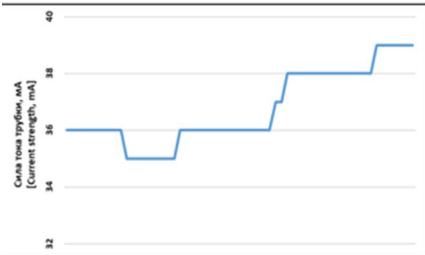
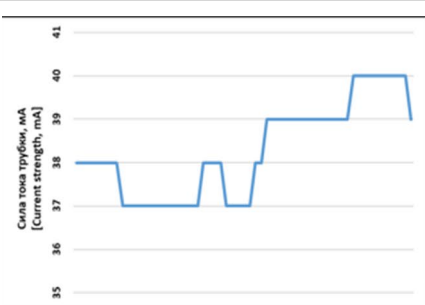
Наборы параметров [Parameter sets]	Набор параметров 1 [Parameter set 1]	Набор параметров 2 [Parameter set 2]	Набор параметров 3 [Parameter set 3]	Набор параметров 4 [Parameter set 4]	Набор параметров 5 [Parameter set 5]
Сила тока, мА [Tube current, mA]	85-96	32	87	35-39	37-40
					

Таблица 6. Графики изменения тока рентгеновской трубки, полученные при сканировании фантома 5-летнего ребенка (вариант 2) при использовании параметров сканирования, представленных в таблице 3

Table 6. Graphs of the tube current variation obtained during the scanning of the 5-year-old child phantom (Option 2) using the scan parameters presented in Table 3

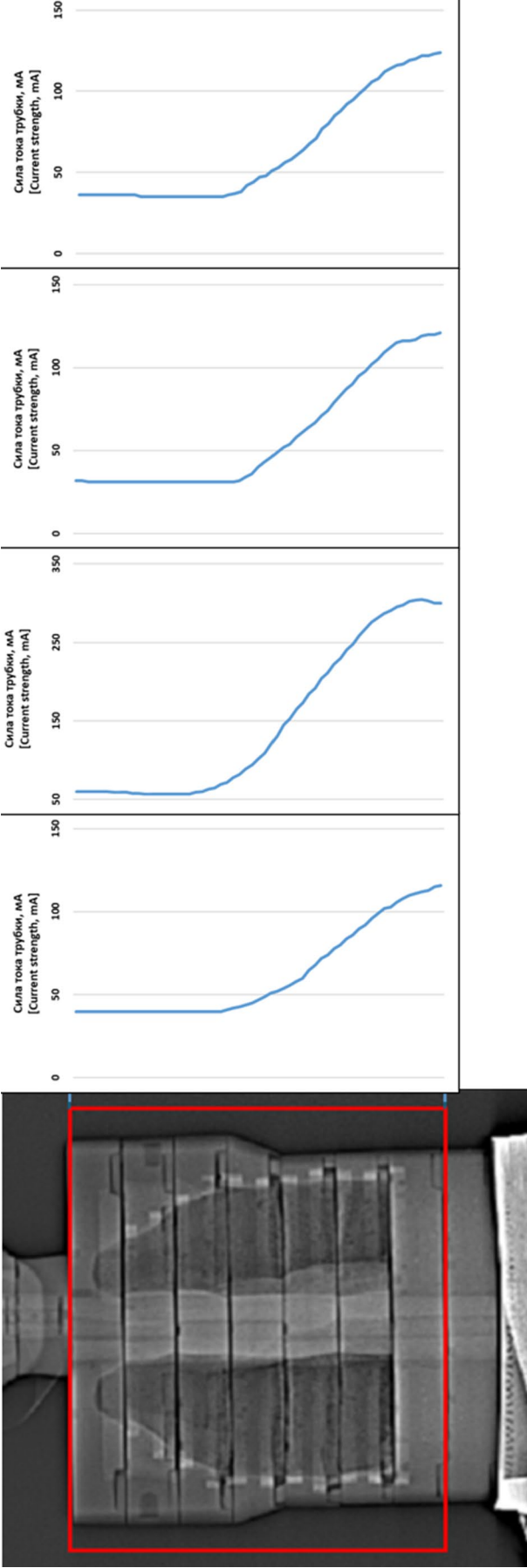
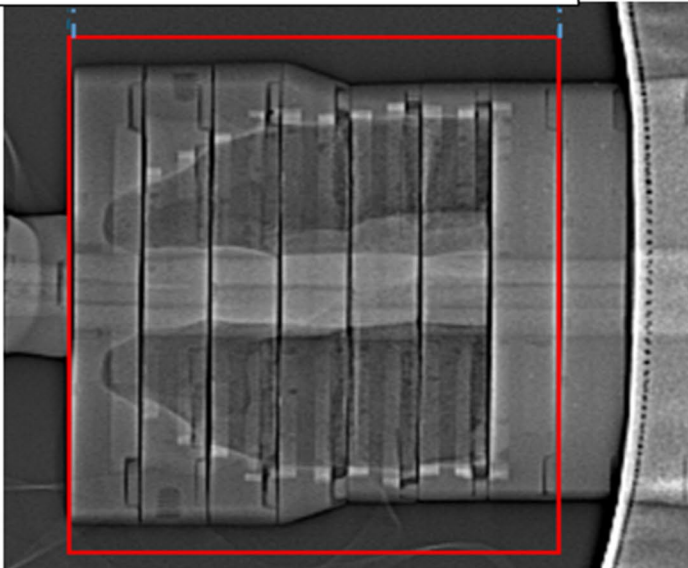
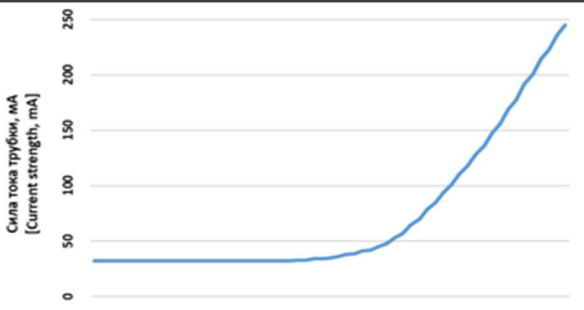
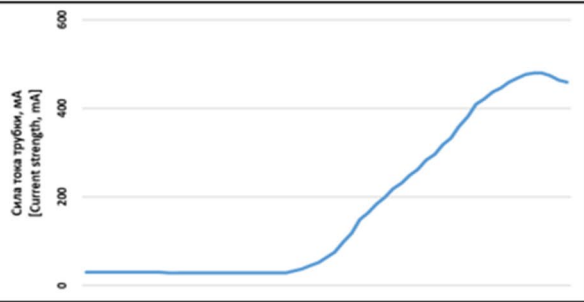
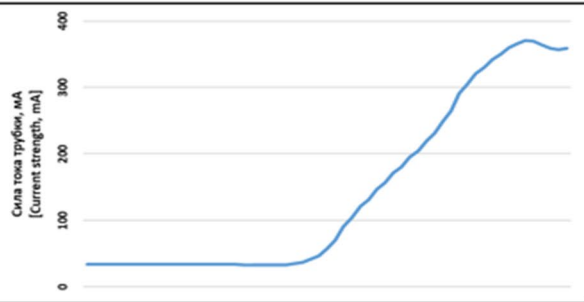

Наборы параметров [Parameter sets]	Набор параметров 1 [Parameter set 1]	Набор параметров 2 [Parameter set 2]	Набор параметров 3 [Parameter set 3]	Набор параметров 4 [Parameter set 4]
Сила тока, мА [Tube current, mA]	40-116	57-305	31-121	35-124
				

Таблица 7. Графики изменения тока рентгеновской трубки, полученные при сканировании фантома 5-летнего ребенка (вариант 3) при использовании параметров сканирования, представленных в таблице 4

Table 7. Graphs of the tube current variation obtained during the scanning of the 5-year-old child phantom (Option 3) using the scan parameters presented in Table 4

Наборы параметров [Parameter sets]	Набор параметров 2 [Parameter set 2]	Набор параметров 3 [Parameter set 3]	Набор параметров 4 [Parameter set 4]	Набор параметров 1 [Parameter set 1]
Сила тока, мА [Tube current, mA]	32-245	28-481	34-371	40-708
				

При сканировании фантома при одновременно включенных программах Care kV и Care Dose 4D аппарат автоматически установил напряжение 70 кВ после проведения топограммы (табл. 5, набор параметров 1).

Для всех наборов параметров сканирования начальное значение силы тока было различным (табл. 5) и устанавливалось оборудованием после проведения топограммы. Для наборов параметров 2 и 3 начальное значение тока не изменялось на протяжении всего сканирования, т.к. программа Care Dose 4D была выключена. Несмотря на разные значения напряжения, для наборов параметров 1, 4 и 5 (при которых программа Care Dose 4D была включена) наблюдались схожие изменения кривой тока трубки, при которых ток изменялся в зависимости от толщины и плотности фантома на протяжении всей области сканирования. Меньшие значения тока трубки при больших значениях напряжения могут объясняться тем, что таким образом программа Care Dose 4D пытается снизить дозу (табл. 5, набор параметров 4, 5). При 70 кВ, программа Care Dose 4D, наоборот, поднимала начальное значение тока до 85 мА, чтобы компенсировать низкие значения напряжения (табл. 5, набор параметров 1).

Отключение программ АМСТ может приводить к повышению дозы облучения в тех областях, где она могла бы быть снижена и, наоборот, в областях с повышенной толщиной и плотностью тканей силы тока может быть недостаточно для получения необходимого качества изображения.

Серия сканирований, проведенная с использованием СИЗ в варианте 2 представлена в таблице 6.

При сканировании фантома при одновременно включенных программах Care kV и Care Dose 4D аппарат автоматически установил напряжение 80 кВ после проведения топограммы (что выше на 10 кВ по сравнению со сканированиями без СИЗ) (табл. 6, набор параметров 2). Изменение тока трубки происходило в пределах от 57 мА до 305 мА. Минимальные значения тока трубки наблюдались в начале сканирования, далее значения тока трубки постоянно увеличивались по мере приближения к СИЗ.

В данной серии дополнительно были проведены три сканирования при отключенной программе Care kV (на напряжениях 70 кВ, 80 кВ и 100 кВ) и включенной Care Dose 4D. Данные параметры были использованы в том числе и для последующих сканирований фантома при наложении фартука сверху (вариант 3). Дополнительные сканирования проводились с целью изучить изменение силы тока на протяжении всей длины области сканирования, а также убедиться, что эти изменения силы тока для разных вариантов использования СИЗ схожи. Аналогичные зависимости изменения силы тока при различных вариантах использования СИЗ позволяют убедиться, что на эти изменения влияет именно СИЗ, а работа АМСТ КТ-аппарата всегда одинакова и на нее не влияют какие-либо скрытые и неизвестные нам алгоритмы.

При значении напряжения 80 кВ (при отключенной программе Care kV), диапазон тока во время сканирования находился в пределах 31–121 мА (табл. 6, набор параметров 3). При этом характер изменения кривой тока визуально был схож с кривой тока во время сканирования с выбранным напряжением 80 кВ и при включенных программах АМСТ (табл. 6, набор параметров 2).

Аналогично для значений напряжения 70 кВ (табл. 6, набор параметров 1) и 100 кВ (табл. 6, набор параметров 4) диапазоны тока составили, соответственно, 40–116 мА

и 35–124 мА при сохраняющемся характере изменения кривых тока.

Данная серия сканирований подтверждает факт того, что программы Care kV и Care Dose 4D подбирали параметры сканирования автоматически после проведенной топограммы. В данном случае СИЗ расценивалось как область повышенной плотности. Вследствие чего аппарат автоматически повышал напряжение и силу тока трубки для поддержания заданного качества изображения в этой области.

При сканировании фантома при одновременно включенных программах Care kV и Care Dose 4D аппарат автоматически установил напряжение 100 кВ после проведения топограммы (что выше на 30 кВ по сравнению со сканированиями без СИЗ) (табл. 7, набор параметров 2). Изменение тока трубки происходило в пределах от 32 мА до 245 мА.

В данной серии также было проведено три дополнительных сканирования при отключенной программе Care kV (на напряжениях 70 кВ, 80 кВ и 100 кВ) и включенной Care Dose 4D по тем же причинам, что были описаны выше для серии сканирований при использовании СИЗ вариант 2.

Диапазоны тока составили для 70 кВ 40–708 мА (табл. 7, набор параметров 1), для 80 кВ – 28–481 мА (табл. 7, набор параметров 4), для 100 кВ – 34–371 мА (табл. 7, набор параметров 3). Характер изменения кривых тока был схож у данных сканирований.

В данной серии сканирований (табл. 7) СИЗ расценивается аппаратом не только как область повышенной плотности, но и как «очень крупный» объект за счет выступающих краев СИЗ с обеих сторон фантома. Как результат – аппарат автоматически повышает напряжение и силу тока трубки для получения приемлемого изображения. Программа Care Dose 4D компенсирует высокие значения напряжения путем некоторого снижения силы тока трубки (в сравнении с силой тока трубки при 70 кВ); во всех случаях при приближении к области СИЗ сила тока значительно возрастала.

## Обсуждение

Результаты сканирований (табл. 5–7) показали, что особенности работы программы Care kV заключаются в следующем: после проведения топограммы Care kV автоматически устанавливает необходимое напряжение трубки в зависимости, в первую очередь, от ширины, а также от плотности сканируемого объекта. Выбранное по результатам топограммы напряжение используется для проведения основного сканирования и не изменяется на протяжении всей его длины. Гипотеза о том, что именно ширина СИЗ, а не его плотность, в большей степени влияет на увеличение напряжения тока трубки, может подтверждаться тем, что при использовании СИЗ вариант 3 программа Care kV автоматически выбрала напряжение 100 кВ в отличие от использования СИЗ вариант 2, при котором в область топограммы попало 2 слоя фартука (0,5 мм Pb x 2), когда Care kV выбрала напряжение 80 кВ.

Программа Care Dose 4D при различных вариантах использования СИЗ ведет себя аналогичным образом при выборе начального значения Eff.mAs. Предполагается, что во время топограммы Care Dose 4D «оценивает» участки объекта сканирования – их плотность и размеры. СИЗ, попадающий в область топограммы оценивается, как область с повышенной плотностью и большими размерами. Поэтому во время основного сканирования Care Dose 4D заранее начинает увеличивать силу тока по мере приближения к СИЗ,

т.е. объекту большего размера и плотности, что видно на графиках изменения тока. При этом Care Dose 4D увеличивает силу тока до более высоких значений при использовании СИЗ вариант 3 (245-708 мА) по сравнению с использованием СИЗ вариант 2 (116-305 мА), что также подтверждает большее влияние размера (ширины) СИЗ на работу АМСТ.

На основании проведенных сканирований (табл. 5–7) можно сделать следующие выводы о влиянии СИЗ на результаты работы программ АМСТ:

- программы АМСТ учитывают наличие СИЗ, попадающих в область топограммы;
- СИЗ влияют на параметры сканирования: как на начальные (автоматически устанавливаемые после топограммы), так и на изменение этих параметров в процессе основного сканирования.

Так как СИЗ (при различных вариантах использования) существенно влияет на изменение параметров сканирования, то обоснованно предположить, что использование СИЗ повлечет за собой и увеличение поглощенных доз в отдельных радиочувствительных органах (максимальное увеличение параметров сканирования наблюдалось в зоне радиочувствительных органов), а также эффективной дозы и радиационных рисков. Это требует дополнительных исследований с соответствующей оценкой доз и финальным выводом об обоснованности или необоснованности использования СИЗ при проведении КТ-исследований, на что будет нацелена следующая работа авторов.

### Заключение

Программы автоматической модуляции силы тока и напряжения рентгеновской трубки (CareDose 4D и Care kV) реагируют на СИЗ как на плотную и крупную структуру. В результате АМСТ увеличивают напряжение рентгеновской трубки и начальное значение силы тока основного сканирования. При этом алгоритм работы программа АМСТ не изменяется относительно эталонного сканирования: значение напряжения остается неизменным на протяжении всего сканирования, а силу тока программа продолжает регулировать. Но в отличие от эталонного сканирования регуляция силы тока осуществляется только в одном направлении – в сторону увеличения по мере приближения сканирования к СИЗ.

Влияние СИЗ на поглощенные дозы в отдельных радиочувствительных органах, а также эффективной дозы требует дополнительных исследований с последующей оценкой обоснованности или необоснованности использования СИЗ при проведении КТ-исследований.

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

Шацкий И.Г. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, обработка данных, написание статьи, оформление окончательного варианта статьи для публикации в журнал.

Дружинина П.С. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, обработка данных, написание статьи, оформление окончательного варианта статьи для публикации в журнал.

Чипига Л.А. – осуществление общего научного руководства исследованием, обсуждение и анализ результатов, редакция промежуточного варианта статьи.

Алексеева Д.В. – 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 «Научное обоснование Концепции обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при проведении рентгенорадиологических процедур».

### Литература

1. Stearns B.K., Seitz K., Folck Q.M. Exploring past to present shielding guidelines // Radiological Physics and Technology. 2023. № 95(2). P. 84-93.
2. Marsh R.M., Silosky M. Patient shielding in diagnostic imaging: discontinuing a legacy practice // American Journal of Roentgenology. 2019. № 212(4). P. 755-757. DOI: 10.2214/AJR.18.20508.
3. Khong P.L., Ringertz H., Donoghue V. et al. ICRP publication 121: radiological protection in paediatric diagnostic and interventional radiology // Annals of the ICRP. 2013. No 42(2). P. 1-63. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.10.001.
4. Sullivan Y., Benson E., Hickson G. et al. Guidance on using shielding on patients for diagnostic radiology applications. 2020. 87 p.
5. PS 8-A. AAPM Position Statement on the Use of Patient Gonadal and Fetal Shielding. – [Online resource] – URL: <https://www.aapm.org/org/policies/details.asp?type=PP&id=2552> (Дата обращения: 24.02.2026).
6. Hiles P. Using patient shielding - What is the risk? // British Journal of Radiology. 2021. Vol. 94, No 1126. P. 20210701. DOI: 10.1259/bjr.20210701.
7. McKenney S., Gingold E., Zaidi H. Gonadal shielding should be discontinued for most diagnostic imaging exams // Medical Physics. 2019. Vol. 46, No 3. P. 1111-1114. DOI: 10.1002/mp.13409.
8. Lawrence S., Seeram E. The Current Use and Effectiveness of Bismuth Shielding in Computed Tomography: A Systematic Review. Radiology // Open Journal. 2017. Vol. 2. P. 7-16. DOI: 10.17140/ROJ-2-113.
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. Söderberg M. Overview, practical tips and potential pitfalls of using automatic exposure control in CT: Siemens Care Dose 4D // Radiation Protection Dosimetry. 2016. No 169 (1-4). P. 84-91. DOI: 10.1093/rpd/ncv459.
11. Чипига Л.А. Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1, С. 104-114. (DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-104-114).
12. Olympic Health Physics. How Does CARE Dose4D Work? Online resource - URL: <https://www.olympichp.com/how-does-care-dose4d-work/> (Дата обращения: 24.02.2026).
13. Varchena V. Pediatric phantoms // Pediatric Radiology Journal. 2002. № 32. P. 280–284.
14. 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.
15. Marcus S., Sonny L. Evaluation of adaptation strengths of CARE Dose 4D in pediatric CT. Medical Imaging 2013: Physics of Medical Imaging. 2013. P. 866833. DOI: 10.1117/12.2001694.

Поступила: 19.01.2026

**Шацкий Илья Геннадьевич** – исполняющий обязанности старшего научного сотрудника, 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: i.shatskiy@niirg.ru  
ORCID: 0000-0003-2809-0223

**Дружинина Полина Сергеевна** – исполняющая обязанности научного сотрудника, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены им. профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0003-2921-067X

**Чипига Лариса Александровна** – кандидат технических наук, исполняющая обязанности ведущего научного сотрудника, 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

**Алексеева Дарья Владимировна** – врач-рентгенолог, заведующая отделением лечебной диагностики №1 Университетской клиники, ассистент кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0001-9528-9377

**Для цитирования:** 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. 72–83. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-72-83

---

## Evaluation of the impact of personal protective equipment on the automatic exposure control system in computed tomography

Ilya G. Shatsky<sup>1</sup>, Polina S. Druzhinina<sup>1</sup>, Larisa A. Chipiga<sup>1,2,3</sup>, Darya V. Alekseeva<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

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

*The relevance of this study lies in the need to reconsider established approaches to the use of personal protective equipment in computed tomography due to the widespread implementation of automatic tube current and voltage modulation algorithms. Since PPE can distort the input data for these algorithms, their use may not only fail to reduce but could also unjustifiably increase the patient's radiation dose, which requires detailed experimental verification, especially in pediatric practice where patients are most sensitive to ionizing radiation. The aim of this work is to assess the influence of personal protective equipment on the performance of the automatic tube current and voltage modulation programs (CareDose 4D and Care kV) during CT examinations on a Somatom Force (Siemens) scanner, using an anthropomorphic phantom of a five-year-old child. Materials and Methods: The study was conducted at the CT department of the Almazov National Medical Research Centre using an anthropomorphic phantom of a five-year-old child and a technically sound Somatom Force (Siemens) tomograph. To assess the impact of personal protective equipment on the operation of the automatic current and voltage modulation programs (CareDose 4D and Care kV), a series of phantom scans was performed with and without various positioning options for a protective lead apron, simulating real clinical practice. Results and Discussion: The results showed that when a lead apron enters the topogram area, the system interprets this as an increase in the patient's body size and density, which automatically increases the radiation parameters compared to a scan performed without the lead apron. Conclusion: Evaluating the impact of this effect on absorbed and effective doses requires further research to determine the appropriateness of using personal protective equipment in computed tomography.*

**Key words:** computed tomography, patient, radiation protection, personal protective equipment, protective apron, tube current modulation.

---

**Ilya G. Shatsky**

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

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

### Authors' personal contribution

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.

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.

Chipiga L.A. – providing overall scientific guidance for the research, discussing and analyzing the results, and editing the draft manuscript.

Alekseeva D.V. – organizing experimental work in the CT department.

### Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

### Sources of funding

This article was prepared as part of the sectoral research project "Scientific Substantiation of the Concept for Ensuring Radiation Safety of the Population of the Russian Federation during X-ray and Radiological Procedures."

### References

1. Stearns BK, Seitz K, Folck QM. Exploring Past to Present Shielding Guidelines. *Radiological Physics and Technology*. 2023;95(2): 84-93.
2. Marsh RM, Silosky M. Patient shielding in diagnostic imaging: discontinuing a legacy practice. *American Journal of Roentgenology*. 2019;212(4): 755-757. DOI: 10.2214/AJR.18.20508.
3. Khong PL, Ringertz H, Donoghue V, Frush D, Rehani M, Appelgate K, et al. ICRP publication 121: radiological protection in paediatric diagnostic and interventional radiology. *Annals of the ICRP*. 2013;42(2): 1-63. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.10.001.
4. Sullivan Y, Benson E, Hickson G, Helen H, Phil C, Robert L, et al. Guidance on using shielding on patients for diagnostic radiology applications. 2020. 87 p.
5. PS 8-A. AAPM Position Statement on the Use of Patient Gonadal and Fetal Shielding. [Online resource] URL: <https://www.aapm.org/org/policies/details.asp?type=PP&id=2552> (Accessed: 24.02.2026).
6. Hiles P. Using patient shielding - What is the risk? *British Journal of Radiology*. 2021;94(1126): 20210701. DOI: 10.1259/bjr.20210701.
7. McKenney S, Gingold E, Zaidi H. Gonadal shielding should be discontinued for most diagnostic imaging exams. *Medical Physics*. 2019;46(3): 1111-1114. DOI: 10.1002/mp.13409.
8. Lawrence S, Seeram E. The Current Use and Effectiveness of Bismuth Shielding in Computed Tomography: A Systematic Review. *Radiology, Open Journal*. 2017;2: 7-16. DOI: 10.17140/ROJ-2-113.
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. Söderberg M. Overview, practical tips and potential pitfalls of using automatic exposure control in CT: Siemens Care Dose 4D. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169(1-4): 84-91. DOI: 10.1093/rpd/ncv459.
11. Chipiga LA. Evaluation of tube current modulation programmes for the optimization of scan protocols in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 104-114. (DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-104-114) (In Russian).
12. Olympic Health Physics. How Does CARE Dose4D Work? - [Online resource] URL: <https://www.olympichp.com/how-does-care-dose4d-work/> (Accessed: 24.02.2026).
13. Varchena V. Pediatric phantoms. *Pediatric Radiology Journal*. 2002;32: 280-284.
14. 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).
15. Marcus S, Sonny L. Evaluation of adaptation strengths of CARE Dose 4D in pediatric CT. *Medical Imaging 2013: Physics of Medical Imaging*. 2013: 866833 DOI: 10.1117/12.2001694.

Received: January 19, 2026

**For correspondence: Ilya G. Shatsky** – 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: i.shatskiy@niirg.ru)  
ORCID: 0000-0003-2809-0223

**Polina S. Druzhinina** – Junior Research Fellow, Laboratory of Radiation Hygiene of Medical Facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia  
ORCID: 0000-0003-2921-067X

**Larisa A. Chipiga** – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Laboratory of Radiation Hygiene of Medical Facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Research Fellow, A.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

**Darya V. Alekseeva** - Radiologist, Head of the Department of Medical Diagnostics No. 1 at the University Clinic, Assistant at the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia  
ORCID: 0000-0001-9528-9377

**For citation: Shatsky I.G., Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Alekseeva D.V. Evaluation of the impact of personal protective equipment on the automatic exposure control system in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 72–83. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-72-83**

## Риск заболевания солидными злокачественными новообразованиями у потомков населения, облученного на Южном Урале

Завьялов Д.А., Крестинина Л.Ю.

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

*Исследования последствий родительского прекоцептивного облучения для здоровья потомков до настоящего времени не имеют достаточных убедительных доказательств выявленного вреда, что подтверждает важность исследований в данном направлении. Целью работы является анализ риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте потомков облученного населения за период с 1956 по 2020 год. Материалы и методы: Численность аналитической когорты составила 24952 человека, средний возраст к концу наблюдения составил 40 лет. За 65-летний период зарегистрировано 569 солидных злокачественных новообразований. Доза на гонады родителей рассчитана на основе дозиметрической системы TRDS2016, разработанной сотрудниками Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики. Медианная доза на яичники матерей членов когорты составила 6,1 мГр, на яички отцов – 4,5 мГр, суммарная доза на гонады родителей – 31,2 мГр. Для оценки риска применен регрессионный анализ с Пуассоновским распределением с использованием программ статистического пакета EPICURE. Результаты исследования и обсуждение: Анализ риска заболеваний всеми солидными злокачественными новообразованиями среди потомков облученных родителей не выявил значимой зависимости от гонадной дозы родителей. В то же время у членов когорты выявлена значимая зависимость риска рака лёгких от гонадной дозы матери и суммарной гонадной дозы родителей. Заключение: Результаты хорошо согласуются с аналогичными данными по смертности в этой же когорте. Точечные величины риска рака лёгких имеют широкий доверительный интервал, что указывает на имеющуюся неопределенность и требует дальнейшего изучения.*

**Ключевые слова:** Уральская когорта потомков облученного населения, избыточный относительный риск, солидные злокачественные новообразования, рак лёгких, облученное население, заболеваемость.

### Введение

Радиационно-индуцированные эффекты у потомков облученных родителей в человеческих популяциях остаются важной проблемой радиобиологии с момента открытия таковых у экспериментальных животных в первой половине прошлого века.

В 2022 году МКРЗ сформировало рабочую группу с целью изучения доступной научной литературы на тему радиационно-индуцированных эффектов у потомков лиц, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения. Финальный отчет, запланированный на 2026 г., должен стать одним из шагов к пересмотру рекомендаций МКРЗ по радиационной защите. В рамках проекта были подготовлены обзоры научной литературы за периоды 1988-2018 гг. и 2018–2022 гг. В совокупности рассмотренные работы дают всесторонний обзор имеющихся эпидемиологических данных о наследственных эффектах родительского прекоцептивного облучения от профессиональных, медицинских или экологических источников. Авторы заключают: «... в имеющихся доказательствах недостаточно подробностей, чтобы сделать возможной формальную оценку неблагоприятных последствий, связанных с радиацией, у необлученных потомков человека после облучения родителей» [1], «... результаты не дают убедительных доказательств связи между

неблагоприятными эффектами у необлученных детей и родительским прекоцептивным воздействием радиации, но интерпретация результатов затруднена ограничениями, связанными с некоторыми из опубликованных статей» [2]. Все вышеперечисленное подчеркивает важность дальнейших исследований в этом направлении.

**Цель исследования** – анализ риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями (ЗНО) в Уральской когорте потомков облученного населения (УКПОН). УКПОН включает в себя потомков, которые сами не облучались в постнатальном периоде, а их родители получили облучение на реке Тече или на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), что позволяет оценить эффекты облучения половых клеток родителей отдельно от эффектов постнатального облучения [3]. Анализ заболеваемости и смертности от ЗНО у потомков облученных родителей является первым шагом по изучению эффектов у данной популяции [4, 5].

### Материалы и методы

#### Когорта

УКПОН включает потомков населения, облученного на Южном Урале в период с 01.01.1950 г. по 31.12.1960 г. в результате двух радиационных ситуаций (сброс отходов

**Завьялов Данила Александрович**

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

Адрес для переписки: 454141, Челябинск, ул. Воровского, д. 68-А; E-mail: dan.zavyalov2012@gmail.com

в реку Течу и образование ВУРС) и не получавших постнатального облучения [3]. Мониторинг заболеваемости ЗНО проводился на ограниченной территории (5 районов Челябинской области, г. Челябинск и г. Озерск) и за более короткий период (с 01.01.1956 г. по 31.12.2020 г.) по сравнению с анализом смертности. При анализе смертности территория наблюдения за смертностью включала всю Челябинскую и Курганскую области, а период наблюдения начинался с 1950 г. [4]. Различия в периоде и территории наблюдения при анализе смертности и заболеваемости связаны с ограничением наличия и доступности к информации о случаях заболеваний ЗНО за столь длительный период.

При текущем анализе риска заболеваемости солидными ЗНО из всей когорты потомков (34548 чел.) [3] были исключены 9596 человек, которые не проживали на территории наблюдения заболеваемости (ТНЗ) в период наблюдения (умерли, заболели ЗНО или выбыли с ТНЗ до 01.01.1956 г.). В итоге численность аналитической когорты составила 24952 человека. На конец периода наблюдения 15417 человек были живы и проживали на ТНЗ, 3540 человек (17 % от всей когорты) умерли, 3916 человек (16 %) мигрировали с ТНЗ, а для 2079 человек жизненный статус к 31.12.2020 г. был неизвестен.

В таблице 1 представлены демографические характеристики членов УКПОН и средние дозы на гонады родителей.

Таблица 1. Демографические характеристики членов УКПОН\*  
[Table 1. Demographic characteristics of UCEPO\* members]

Характеристика [Characteristics]	Мужчины [Male]	Женщины [Female]	Татары и башкиры [Tartars & Bashkirs]	Русские [Russian]	Вся когорта [Whole cohort]
Число человек, (доля в группе, %) [Persons, (% of group total)]	12580 (50,4)	12372 (49,6)	13302 (53,3)	11650 (46,7)	24952 (100)
Число ЗНО [Cancer cases]	237	332	300	269	569
Человеко-лет [Person-years]	424419	426280	479970	370728	850698
Средний достигнутый возраст потомков [Offspring mean attained age]	39,6	39,8	41,1	38,1	39,7
Средний возраст отца, лет [Father's mean age]	29,8	29,7	30,7	28,6	29,8
Средний возраст матери, лет [Mother's mean age]	27,5	27,5	28,3	26,6	27,5
Численность по году рождения, чел. (доля в группе, %) [Distribution by birth year (% of group total)]					
1950-1959	878 (7)	877 (7,1)	1120 (8,4)	635 (5,5)	1755 (7)
1960-1969	4731 (37,6)	4447 (35,9)	5406 (43,7)	3772 (30,5)	9178 (36,8)
1970-1979	4137 (32,9)	4196 (33,9)	3894 (31,5)	4439 (35,9)	8333 (33,4)
1980-1989	2576 (20,5)	2582 (20,9)	2596 (21)	2562 (20,7)	5158 (20,7)
1990-1999	238 (1,9)	257 (2,1)	274 (2,2)	221 (1,8)	495 (2)
2000-2009	16 (0,1)	11 (0,1)	9 (0,1)	18 (0,1)	27 (0,1)
2010-2019	4 (< 0,1)	2 (< 0,1)	3 (< 0,1)	3 (< 0,1)	6 (< 0,1)
Средняя / медианная доза на гонады, мГр [Mean / median gonadal dose, mGy]					
Суммарная [Total parental]	86,5 / 30,0	88,3 / 31,8	106,9 / 73,3	62,0 / 16,5	87,4 / 31,2
Отца [Paternal]	39,1 / 4,2	41,6 / 4,7	49,7 / 8,6	28,8 / 1,2	40,6 / 4,5
Матери [Maternal]	46,9 / 6,1	46,7 / 6,1	57,3 / 13,9	33,2 / 3,7	46,8 / 6,1

\* УКПОН - Уральская когорта потомков облученного населения [\* UCEPO – Urals Cohort of Exposed Population Offspring].

В когорте равное количество мужчин и женщин, доля русского населения составляет 47 %, а татар и башкир – 53 %. В период с 1950 по 1989 годы родились 98 % потомков. Потомки более поздних годов рождения чаще имели возрастных отцов и более молодых матерей. Возрастной диапазон у родившихся с 1950 до 1990 года к 2020 году составлял от 30 до 70 лет, при этом потомки в возрасте от 60 до 70 лет могли составлять не более 6 % (с учетом того, что часть из них уже умерла). Следует отметить, что средний возраст членов когорты к концу наблюдения составил около 40 лет, максимальный – 72 года.

Для оценки зависимости риска здоровью от гонадной дозы родителей сотрудниками ЮУрФНКЦ МБ были рассчитаны дозы на гонады матери и отца на дату рождения ребенка. Расчет проводился с использованием дозиметрической системы TRDS-2016 [6]. Медианная доза на яичники матерей всех членов УКПОН составила 6,1 мГр, на яички отцов – 4,5 мГр, суммарная на гонады родителей – 31,2 мГр. Максимальные гонадные дозы родителей не превышали 1-1,2 Гр. Дозы на гонады родителей у потомков мужского и женского пола почти не отличались, но у потомков татар-

ской и башкирской национальностей гонадные дозы как отцов, так и матерей были выше аналогичных у потомков славян, что связано с местами проживания родителей.

Случаи новообразований, выявленные у потомков на территории наблюдения за весь период, включают 627 ЗНО, в том числе 569 (90,7 %) солидных ЗНО и 58 (9,3 %) случаев-ЗНО лимфоидной и кроветворной ткани. На долю мужчин приходится 41,7 % солидных ЗНО, на долю женщин – 58,3 %. На долю русских приходится 52,2 % солидных ЗНО, на долю татар и башкир – 47,8 %.

Структура заболеваемости солидными ЗНО рассматривалась ранее в отдельной статье [4]. Обобщая, можно отметить, что у женщин чаще всего встречаются новообразования женских репродуктивных органов, молочной железы, щитовидной железы, всего кишечника и органов верхних отделов пищеварительного тракта; у мужчин – органов дыхания, верхних отделов пищеварительного тракта и всего кишечника. Особенности распределения ЗНО по полу связаны с молодым возрастом членов когорты (около 40 лет), поскольку наиболее распространенные типы рака у женщин, а именно молочной железы и женских репродуктивных органов, уже начали реализовываться, тогда как прочие локализации ЗНО реализуются чаще после 50 лет [7].

Статистические методы

Расчет избыточного относительного риска (ИОР) заболеваемости солидными ЗНО в УКПОН проводился с помощью статистического пакета EPICURE, программами DATAB и AMFIT в соответствии с методикой [8]. Для расчета риска солидных ЗНО использовался регрессионный анализ с Пуассоновским распределением по простой параметрической модели ИОР.

Модель ИОР представлена формулой:

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

где  $\lambda(a,d,z)$  – общий риск заболеваемости ЗНО в зависимости от достигнутого возраста (a), дозы (d) и других факторов (z);  $z_0$  – другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни ( $\lambda_0$ ),  $z_1$  – факторы, которые могут модифицировать ИОР. Избыточный риск описывается как произведение функции дозового ответа  $p(d)$  на функцию модификации эффекта ( $\varepsilon(z_1)$ ).

Статистическая значимость и 95 % доверительные интервалы (ДИ) оценены методом максимального правдоподобия, используемого в программах DATAB и AMFIT. Описание статистических методов, используемых для анализа рисков в УКПОН, более подробно представлено в ранее опубликованных статьях [4, 5, 9, 10].

С помощью программы DATAB был сформирован файл данных, в котором все случаи и человеко-годы были стратифицированы по следующим параметрам: пол, национальность (татары и башкиры или русские), территория наблюдения (6 категорий), достигнутый возраст (8 категорий по 10 лет), период наблюдения (8 категорий), дозовые категории для дозы на гонады отца, матери или их суммарной дозы (8 категорий с начальными дозами 0; 0,002; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; > 0,5 Гр), вероятность внутриутробного облучения (есть, нет, неизвестно), наличие рака у родственников (есть или нет). Также были дополнительно созданы категории «возраст матери на год рождения ребенка» (до 35 лет, старше 35 и возраст матери неизвестен), «возраст отца на год рождения ребенка» (до 45 лет, старше 45 и возраст отца неизвестен). Предварительный анализ программой AMFIT

заклучался в оценке влияния вышеперечисленных параметров на базовые, т.е. не связанные с дозой облучения, уровни заболеваемости солидными ЗНО в различных сочетаниях. На втором этапе при оценке дозовой зависимости риска заболеваемости солидными ЗНО от гонадной дозы отца, матери и суммарной дозы родителей в модель включались параметры, значимо влияющие на базовые уровни.

Результаты и обсуждение

Риск солидных ЗНО

В результате оценки базовых уровней заболеваемости солидными ЗНО в модель ИОР включены следующие факторы, имеющие статистически значимое влияние на показатели: пол (заболеваемость выше у женщин,  $p < 0,05$ ), национальность (заболеваемость выше у русских,  $p < 0,05$ ), наличие рака у родственников (выше при наличии таковых,  $p < 0,05$ ), возраст отца на год рождения ребенка (выше при возрасте отца больше 45,  $p < 0,05$ ), достигнутый возраст (заболеваемость растет с возрастом,  $p < 0,05$ ).

Были протестированы линейная, квадратичная и линейно-квадратичная зависимости показателей заболеваемости солидными ЗНО от материнской, отцовской или от суммарной дозы на гонады родителей. При подборе модели, наилучшим образом, описывающей дозовую зависимость, сравнивались: параметр «отклонение», рассчитанный программой, диапазон 95 % ДИ и р-значение. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Величины ИОР солидных ЗНО в УКПОН от дозы на гонады родителей (линейная и квадратичная модели)

[Table 2. Solid cancer ERR values in UCEPO as a function of parental gonadal dose (linear and quadratic models)]

Модель [Model]	ИОР/Гр* (95 % ДИ) [ERR/Gy* (95 % CI)]	Отклонение [Deviance]	p
Доза на гонады матери [Maternal gonadal dose]			
Линейная [Linear]	0,35 (-0,56; 1,25)	4333,587	0,44
Квадратичная [Quadratic]	0,42 (-1,42; 2,26)	4333,976	> 0,5
Доза на гонады отца [Paternal gonadal dose]			
Линейная [Linear]	-0,24 (-1,08; 0,6)	4333,882	> 0,5
Квадратичная [Quadratic]	-0,18 (-1,71; 1,34)	4334,133	> 0,5
Суммарная доза на гонады родителей [Total parental gonadal dose]			
Линейная [Linear]	0,05 (-0,51; 0,61)	4334,153	> 0,5
Квадратичная [Quadratic]	0,07 (-0,73; 0,86)	4334,145	> 0,5

\*ИОР/Гр – избыточный относительный риск на 1 Гр [ERR/Gy\* – Excess Relative Risk per 1 Gy].

При использовании любой из доступных доз не было получено статистически значимых оценок риска заболеваемости всеми солидными ЗНО ни по одной из моделей. Значительных различий в величине параметра «отклонение» также не было обнаружено. Ширина ДИ не отличалась вне зависимости от выбранной дозы или модели. Добавление к линейной модели квадратичного члена не улучшало подгонку (поэтому данные для линейно-квадратичной модели не приводятся). Были получены положительные, но статистически

незначимые величины риска заболеваемости всеми солидными ЗНО у потомков облученных родителей в зависимости от дозы на гонады матери, и, как следствие, от суммарной гонадной дозы родителей (табл.2).

Несмотря на отсутствие статистически значимых величин ИОР заболеваний всеми солидными ЗНО для всех членов УКПОН, дополнительно была проведена оценка возможной модификации дозового ответа нерадиационными факторами. В качестве факторов, модифицирующих дозовый ответ, были рассмотрены: пол, национальность, наличие рака у родственников (есть, нет), возраст отца (до 45 лет, старше 45 или возраст отца неизвестен) и возраст матери (до 35 лет, старше 35 или возраст матери неизвестен) на момент рождения ребёнка, наличие внутриутробного облучения (не было, было, неизвестно), а также влияние достигнутого возраста (5, 20, 50 лет). В результате анализа не было выявлено дозовой зависимости риска ЗНО ни в одной из рассматриваемых групп ни для одной из доз.

*Риск солидных ЗНО отдельных локализаций*

Был проведён анализ дозовой зависимости заболеваемости ЗНО отдельных локализаций с наибольшим количеством случаев. Среди них солидные ЗНО: легких (45 случаев у мужчин и 11 у женщин), желудка (26 и 14 случаев соответственно), молочной железы (86 случаев), шейки матки (37 случаев) и толстой кишки (10 случаев у мужчин и 12 случаев у женщин). Следует отметить, что оценки риска ЗНО в УКПОН как для всех солидных ЗНО, так и отдельных локализаций на данном этапе исследований носят предварительный характер, т.к. сохраняют некоторую неопределённость, связанную, в основном, с небольшим количеством

случаев ЗНО из-за относительно молодого среднего возраста членов когорты. Так, средний возраст когорты к концу наблюдения составляет около 40 лет (максимальный – 72 года). При этом большинство случаев ЗНО в УКПОН зарегистрировано у лиц в возрасте старше 40 лет [5], а данные государственной статистики говорят о возрасте максимальной реализации от 30 до 59 лет [7].

В рамках данного исследования из всех локализаций только ЗНО лёгких показали статистически значимую зависимость от гонадной дозы родителей.

При анализе базовых уровней заболеваемости ЗНО лёгких была выявлена их зависимость от следующих факторов: пол (заболеваемость выше у мужчин), достигнутый возраст (экспоненциальное увеличение с возрастом), что было учтено в модели при оценке дозовой зависимости.

Статистически значимый риск ЗНО лёгких был получен при использовании линейной модели риска с дозой на гонады матери (4,9/Гр; 95 % ДИ: 0,79; 12,86),  $p=0,01$  (табл. 3)). Зависимость ИОР от гонадной дозы матери отразилась и на оценке зависимости ИОР от суммарной родительской дозы на гонады (ИОР/Гр 2,22; 95 % ДИ: 0,14; 6,42),  $p=0,03$ ). Добавление квадратичного компонента в линейную модель не улучшило результат и в таблице не представлено. Квадратичная модель также статистически значимо описывает дозовую зависимость при использовании дозы на гонады матери (ИОР 9,57/Гр; 95 % ДИ: 0,87; 27,08,  $p=0,02$ ) и суммарной гонадной дозы (ИОР 3,84/Гр; 95 % ДИ: 0,5; 10,65,  $p=0,01$ ). Зависимость от дозы на гонады отца получена положительная, но статистически незначимая. ДИ линейной и квадратичной моделей во всех случаях пересекаются (при этом их ширина указывает на сохраняющуюся долю неопределённости).

Таблица 3. Величины ИОР ЗНО легких в УКПОН от дозы на гонады родителей (линейная и квадратичная модели)  
[Table 3. Lung cancer ERR values in UCEPO as a function of parental gonadal dose (linear and quadratic models)]

Модель [Model]	ИОР/Гр (95 % ДИ) [ERR/Gy (95 % CI)]	Отклонение [Deviance]	p
Доза на гонады матери [Maternal gonadal dose]			
Линейная [Linear]	4,9 (0,79; 12,86)	634,916	0,01
Квадратичная [Quadratic]	9,57 (0,87; 27,08)	636,223	0,02
Доза на гонады отца [Paternal gonadal dose]			
Линейная [Linear]	1,68 (-0,7; 6,27)	640,1	0,23
Квадратичная [Quadratic]	5,44 (-0,75; 19,09)	639,083	0,12
Суммарная доза на гонады родителей [Total parental gonadal dose]			
Линейная [Linear]	2,22 (0,14; 6,42)	636,849	0,03
Квадратичная [Quadratic]	3,84 (0,5; 10,65)	635,201	0,01

При оценке ИОР ЗНО лёгкого была проведена оценка модификации дозового ответа нерадиационными факторами (пол, национальность, достигнутый возраст, возраст родителей, наличие родственников первой линии родства с диагнозом ЗНО). В качестве модели для расчётов была выбрана наиболее простая линейная модель.

Статистически значимые оценки риска были получены для мужчин УКПОН, зависящие от дозы на гонады матери (6,72/Гр; 95 % ДИ: 1,27; 18,58,  $p < 0,05$ ) и от суммарной гонадной дозы (2,71/Гр; 95 % ДИ: 0,17; 8,45,  $p < 0,05$ ). В некоторых группах были получены оценки ИОР с пограничной

значимостью  $p < 0,1$ . Такие значения были получены при анализе зависимости ЗНО от дозы на гонады матери в группе русского населения и в группе с наличием рака у родственников. Не было выявлено значимых оценок риска ЗНО лёгкого в группе женщин, в группе татар и башкир, в группе лиц, не имеющих родственников с заболеваниями ЗНО, а также не выявлено четкой зависимости ИОР от возраста матери или отца, хотя отмечались тенденции более высоких оценок ИОР у потомков, матери которых были старше 35, а отцы – старше 45 лет.

### Заключение

Получены первые результаты анализа риска заболеваемости солидными ЗНО и ЗНО отдельных локализаций в когорте потомков населения, облученного на Южном Урале за 65-летний период наблюдения. В результате анализа не было получено статистически значимой дозовой зависимости риска заболеваемости всеми солидными ЗНО у потомков от гонадных доз родителей. В то же время, при оценке риска заболеваемости ЗНО отдельных локализаций была получена статистически значимая дозовая зависимость риска ЗНО лёгких от дозы на гонады матери и, следствием этого, также от суммарной гонадной дозы родителей. ИОР заболеваемости ЗНО легких при использовании линейной модели и материнской дозы составил 4,9/Гр (95 % ДИ: 0,79; 12,86;  $p=0,01$ ), а для суммарной дозы – 2,22/Гр (95 % ДИ: 0,14; 6,42;  $p=0,03$ ). Квадратичная модель также статистически значимо описывает дозовую зависимость от дозы на гонады матери (ИОР 9,57/Гр; 95 % ДИ: 0,87; 27,08;  $p=0,02$ ) и от суммарной гонадной дозы (ИОР 3,84/Гр; 95 % ДИ: 0,5; 10,65;  $p=0,01$ ), но с более широким ДИ. Также была проведена оценка модификации дозового ответа нерадиационными факторами. При оценке влияния пола на риск заболеваемости ЗНО легкого, у мужчин УКПОН выявлена дозовая зависимость ИОР ЗНО лёгкого от дозы на гонады матери (6,72/Гр; 95 % ДИ: 1,27; 18,58;  $p < 0,05$ ) и от суммарной дозы, (2,71/Гр; 95 % ДИ: 0,17; 8,45;  $p < 0,05$ ), при этом у женщин УКПОН значимой дозовой зависимости не выявлено.

Похожие результаты в этой когорте были получены для риска смерти от всех солидных ЗНО и только от ЗНО лёгких [4]. Так, был получен статистически значимый ИОР смерти от ЗНО лёгких (4,36/Гр; 95 % ДИ: 0,15; 15,48), линейно зависимый от материнской дозы, что несколько ниже риска заболеть ЗНО лёгких (4,9/Гр; 95 % ДИ: 0,79; 12,86). Зависимость ИОР ЗНО лёгких от суммарной дозы по линейной модели, наоборот, несколько выше для смерти, чем заболеваемости (ИОР смерти – 3,95/Гр (95 % ДИ: 0,55; 12,14), а ИОР заболеваний – 2,22/Гр (95 % ДИ: 0,14; 6,42)), хотя все отличия не значимы. При анализе смертности в УКПОН была также получена статистически значимая зависимость ИОР смерти от ЗНО лёгких от дозы на гонады отца, а для заболеваемости ЗНО лёгких такой зависимости не выявлено.

Аналогичные исследования проводились в когорте потомков первого поколения облучённых мужчин работников ПО «Маяк» [11]. Анализ показателей стандартизованного относительного риска заболеваемости ЗНО у потомков мужского пола выявил достоверное превышение стандартизованного относительного риска по отдельным локализациям ЗНО (опухолей органов пищеварения и брюшины, лимфатической и кроветворной тканей среди потомков мужского пола и опухолей органов дыхания и грудной клетки у потомков женского пола) в отдельных дозовых группах. Но при расчёте ИОР как для всех ЗНО, так и для только солидных ЗНО достоверного превышения не было выявлено.

Указанные различия и относительно широкий доверительный интервал величин риска ЗНО легких требуют осторожной интерпретации полученных результатов и свидетельствуют о необходимости продолжения данных исследований с расширением периода наблюдения, увеличения возраста членов когорты и количества случаев ЗНО в данной когорте, а также, по возможности, более детальным исследованием влияния на величину эффекта нерадиационных

факторов, информация о которых в настоящее время ограничена.

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

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

Крестинина Л.Ю. – дизайн исследования, анализ риска, интерпретация данных, редакция финального варианта статьи.

### Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам ЮУрФНЦ 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

- Stephens J., Moorhouse A.J., Craenen K. et al. A systematic review of human evidence for the intergenerational effects of exposure to ionizing radiation // *International Journal of Radiation Biology*. 2024. Vol. 100, № 9. P. 1330–1363, DOI: 10.1080/09553002.2024.2306328.
- Amrenova A., Baudin C., Ostroumova E. et al. Intergenerational effects of ionizing radiation: review of recent studies from human data (2018–2021) // *International Journal of Radiation Biology*. 2024. Vol. 100, № 9. P. 1253–1263, DOI: 10.1080/09553002.2024.2309917.
- Крестинина Л.Ю., Шалагинов С.А., Старцев Н.В. Уральская когорта потомков облучённого населения // *Вопросы радиационной безопасности*. 2022. Т. 108, № 4. С. 86–94.
- Завьялов Д.А., Крестинина Л.Ю. Риск смерти от злокачественных новообразований в Уральской когорте потомков облученного населения // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, №3, С. 39–48. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2024-17-3-39-48>.
- Завьялов Д.А., Крестинина Л.Ю. Анализ заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте потомков облученного населения // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2024. Т. 69, № 6. С. 51–55. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-6-51-55.
- Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I. et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose from Environmental Exposures // *Health Physics*. 2019. Vol. 117, № 4. P. 378–87. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
- Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна и др. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. 276 с.

8. Preston D.L., Lubin J.H., Pierce D.A., McConney M.E. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company, 1993.
9. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., Епифанова С.Б., Аклеев А.В. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017 // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 6–17. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17>.
10. 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.
11. Кабировва Н.Р., Окатенко П.В. Последствия отцовского облучения: оценка канцерогенного риска в когорте потомков первого поколения // Вопросы радиационной безопасности. 2022. Т. 105, № 1. С. 34–49.

Поступила: 21.07.2025

**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. **Адрес для переписки:** 454141, Челябинск, ул. Воровского, д. 68-А.; E-mail: dan.zavyalov2012@gmail.com  
ORCID: 0009-0005-8754-1655

**Крестинина Людмила Юрьевна** – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории исследований эффектов облучения населения, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия  
ORCID: 0000-0003-0497-5879

**Для цитирования:** Завьялов Д.А., Крестинина Л.Ю. Риск заболевания солидными злокачественными новообразованиями у потомков населения, облученного на Южном Урале // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 84–90. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-84-90

## Solid cancer incidence risk in offspring of parents exposed in the South Urals

Danila A. Zavyalov, Lyudmila Yu. Krestinina

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

*To date, studies of the effects of parental pre-conceptional radiation exposure on the health of offspring have not provided sufficient evidence to confirm the detected harm. This underscores the importance of ongoing research in this area. The objective of the study is to analyze the risk of solid cancer incidence in the Urals Cohort of Exposed Population Offspring for the period from 1956 to 2020. Materials and methods: the number of the analyzed cohort amounted to 24952 people, the average age by the end of the follow-up period was 40 years. During the 65-year period, 569 solid cancers were registered. The dose to the parents' gonads was calculated based on the TRDS2016 dosimetry system developed by the staff of the Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics. The median dose to the ovaries of mothers of the cohort members was 6.1 mGy, to the testes of fathers - 4.5 mGy, total parental gonadal dose - 31.2 mGy. Regression analysis with Poisson distribution using EPICURE statistical package programs was applied for risk assessment. Results: risk analysis of all solid cancer incidence among the offspring of exposed parents did not reveal a significant dependence on parental gonadal dose. At the same time, a significant dependence of the lung cancer risk on maternal and total parental gonadal doses was found among cohort members. The results are in good agreement with similar mortality data in the same cohort. The point values of lung cancer risk have a wide confidence interval, indicating that uncertainty exists and requires further investigation.*

**Key words:** *Urals Cohort of Exposed Population Offspring, excess relative risk, solid cancer, lung cancer, exposed population, incidence.*

### Authors' personal contribution

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

Krestinina L.Yu. – study design, risk analysis, data interpretation, revision of the final version of the article.

**Danila A. Zavyalov**

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

**Address for correspondence:** 68A, Vorovsky Str., Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: dan.zavyalov2012@gmail.com

### Acknowledgments

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

- Stephens J, Moorhouse AJ, Craenen K, Schroeder E, Drenos F, Anderson R. A systematic review of human evidence for the intergenerational effects of exposure to ionizing radiation. *International Journal of Radiation Biology*. 2024;100(9): 1330-1363, DOI: 10.1080/09553002.2024.2306328.
- Amrenova A, Baudin C, Ostroumova E, Stephens J, Anderson R, Laurier D. Intergenerational effects of ionizing radiation: review of recent studies from human data (2018–2021). *International Journal of Radiation Biology*. 2024;100(9): 1253-1263, DOI: 10.1080/09553002.2024.2309917.
- Krestinina LYu, Shalaginov SA, Startsev NV. Urals cohort of exposed population offspring *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of radiation safety*. 2022;4(108): 86-94. (In Russian).
- Zavyalov DA, Krestinina LYu. Cancer mortality risk in the Urals Cohort of Exposed Population Offspring. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 39-48. DOI:10.21514/1998-426X-2024-17-3-39-48. (In Russian).
- Zavyalov DA, Krestinina LYu. Analysis of the Incidence of Solid Malignant Neoplasms in the Urals Cohort of Exposed Population Offspring. *Medical radiology and radiation safety*. 2024;69(6): 51–55. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-6-51-55. (In Russian).
- Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYu, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose from Environmental Exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378–87. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
- Malignant neoplasms in Russia in 2023 (morbidity and mortality) / ed. by A.D. Kaprin et al. Moscow: P.A. Herzen Moscow Oncology Research Institute – branch of the Federal State Budgetary Institution "National Institute of Radiology" of the Ministry of Health of the Russian Federation; 2024. 276 p. (In Russian).
- Preston DL, Lubin J, Pierce DA, McConney ME. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993.
- Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleev 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).
- 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).
- Kabirova NR, Okatenko PV. Consequences of paternal irradiation: assessment of carcinogenic risk in the cohort of first-generation offspring. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2022;105(1): 34-49. (In Russian).

Received: July 21, 2025

**For correspondence: 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 (68A, Vorovsky Str., Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: dan.zavyalov2012@gmail.com)  
ORCID: 0009-0005-8754-1655

**Lyudmila Yu. Krestinina** – Candidate of Medical Sciences, Leading 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, Chelyabinsk, Russia  
ORCID: 0000-0003-0497-5879

**For citation: Zavyalov D.A., Krestinina L.Yu. Solid cancer incidence risk in offspring of parents exposed in the South Urals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 84–90. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-84-90**

## Апробация алгоритмов риск-ориентированного подхода к контролю профессионального внутреннего облучения при поступлении соединений плутония

Ефимов А.В., Сокольников М.Э., Соколова А.Б., Ишунина М.В., Аладова Е.Е.

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

*Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов контроля профессионального внутреннего облучения, обусловленного инкорпорацией радионуклидов с длительным периодом полувыведения. Целью работы являлась апробация методического документа, регламентирующего порядок организации контроля внутреннего облучения от плутония на основе риск-ориентированного подхода к ограничению радиационного воздействия на персонал. Решалась задача практического применения методики интерпретации результатов индивидуального дозиметрического контроля при контроле показателя годового приращения пожизненного избыточного риска смерти от радиационно-индуцированного рака. Материалы и методы: В основу системы контроля положен принцип ограничения доз облучения органов депонирования плутония в зависимости от возраста, в котором произошло облучение, а допустимые уровни воздействия плутония позволяют не превышать приемлемую величину радиационно-обусловленного риска в течение всего трудового стажа. На основании данных индивидуального дозиметрического контроля для 44 работников производственного объединения «Маяк» были выполнены расчеты годовых эквивалентных доз на критические органы, а также оценено радиационное воздействие по величине ожидаемой эффективной дозы. Результаты исследования и обсуждение: В большинстве случаев за периоды контроля были зарегистрированы поступления, которые привели к формированию доз внутреннего облучения выше уровня регистрации. Зарегистрированные значения пятидесятилетних ожидаемых эффективных доз, как и значения эквивалентных доз на критические органы, не превысили установленные пределы. В семи случаях эквивалентные дозы на критические органы оказались выше 60 мЗв, при этом годовой избыточный риск за год контроля не превышал  $1 \times 10^{-3}$ . Для всех работников контролируемой группы ни в один из периодов контроля не было зарегистрировано превышения приемлемой величины годового избыточного риска. Заключение: Выполненная тестовая эксплуатация методических указаний показала практическую применимость изложенных в документе методов, позволила выявить недостатки апробируемого подхода и сформулировать предложения по совершенствованию алгоритмов расчета.*

**Ключевые слова:** соединения плутония, радиационный риск, внутреннее облучение, индивидуальный дозиметрический контроль, ожидаемая эффективная доза.

### Введение

Методические указания 2.6.5.078-2018 «Порядок организации контроля внутреннего облучения от плутония на основе риск-ориентированного подхода к ограничению радиационного воздействия»<sup>1</sup> были разработаны в 2018 г. рабочей группой специалистов Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства (ФГБУН ЮУрФНКЦ МБ ФМБА России) по поручению Методического совета

по обеспечению радиационной безопасности в организациях Госкорпорации «Росатом». В 2018 г. методические указания прошли процедуру утверждения ФМБА России и введены в действие с 30 октября 2018 г.

Внедрение МУ 2.6.5.078-2018 в практику на предприятиях Госкорпорации «Росатом», а также в лабораториях дозиметрии внутреннего облучения ФМБА России является важным этапом создания системы контроля внутреннего облучения персонала при поступлении плутония, отвечающей требованиям принципов радиационной безопасности, установленных НРБ-99/2009<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> МУ 2.6.5.078-2018 «Порядок организации контроля внутреннего облучения от плутония на основе риск-ориентированного подхода к ограничению радиационного воздействия». Методическое обеспечение радиационного контроля в атомной отрасли. М., 2019. Т. 6. [Methodological guidelines MU 2.6.5.078-2018 "The procedure for organizing control of internal radiation from plutonium based on a risk-based approach to limiting radiation exposure". Methodological support for radiation control in the nuclear industry. Moscow; 2019. Vol. 6. (In Russ.)]

<sup>2</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

**Ефимов Александр Владимирович**

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: ephimov@subi.su

В рассматриваемых методических указаниях для ограничения облучения персонала при различных путях поступления плутония использован риск-ориентированный подход, основанный на регламентируемом НРБ-99/2009 показателе годового приращения пожизненного избыточного риска смерти от радиационно-индуцированного рака [1, 2]. При ингаляционном поступлении плутония органами, подвергающимися воздействию излучения инкорпорированного плутония, являются прежде всего легкие, печень и костные поверхности, тогда как уровни действия излучения на другие органы и ткани пренебрежимо малы. Вследствие этого для оценки пожизненного избыточного риска смерти от онкологических заболеваний допустимо ограничиться оценкой риска, связанного с облучением органов основного депонирования. Требованиями НРБ-99/2009 установлено, что для персонала предел увеличения пожизненного риска смерти от связанных с действием ионизирующего излучения онкологических заболеваний не должен превышать  $1 \times 10^{-3}$  в год.

Изложенные в действующих в настоящее время методических указаниях 2.6.1.065-2014 «Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования»<sup>3</sup> подходы базируются на интерпретации результатов измерений физических величин, характеризующих внутреннее облучение, т.е. на восстановлении значений величин поступления радионуклидов за год и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленной их поступлением в организм, с использованием соответствующих моделей и в рамках конкретных методик выполнения расчетов.

**Цель исследования** – апробация требований и положений МУ 2.6.5.078-2018 путем выполнения опытной эксплуатации методических указаний на основе данных индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) профессионального внутреннего облучения персонала Федерального Государственного Унитарного предприятия «Производственное объединение «Маяк» (ФГУП «ПО «Маяк»), в ходе которой необходимо рассмотреть задачи формирования групп персонала, включаемых в программу контроля при стандартных условиях облучения, и сравнить индивидуальные параметры внутреннего облучения, полученные при использовании подходов действующих МУ 2.6.1.065-2014 и внедряемых МУ 2.6.5.078-2018.

### Материалы и методы

Для описания смертности от радиационно-обусловленных онкологических заболеваний в МУ 2.6.5.078-2018 используется модель избыточного относительного риска [3], полученная при анализе данных когорты персонала ФГУП «ПО «Маяк» [4]. Эта модель описывает зависимость смертности от рака определенной локализации от дозы радиационного воздействия, возраста, пола и фактора курения. По величине накопленной дозы в критическом органе за каждый год работы в контакте с соединениями плутония и зависимости показателя риска от дозы и достигнутого возраста оценивается показатель относительного избыточного риска за каждый год контакта с плутонием. При этом учитывается лаг-период, равный пяти

первым годам облучения, в течение которых величина риска, связанного с дозой, равна нулю. Разница между смертностью от рака критического органа и «фоновой» смертностью от рака этого органа соответствует величине пожизненного радиационно-индуцированного риска. При ингаляционном пути поступления оксида плутония критическим органом, определяющим величину пожизненного избыточного риска, являются легкие, а нитрата плутония – печень.

В основу системы контроля поступления плутония в МУ 2.6.5.078-2018 положен принцип ограничения доз облучения органов депонирования плутония в зависимости от возраста, в котором произошло облучение, а допустимые уровни воздействия плутония позволяют не превысить приемлемую величину радиационно-обусловленного риска в течение всего трудового стажа (50 лет). В МУ 2.6.5.078-2018 представлены таблицы, позволяющие по измеренной активности в суточных количествах мочи (СКМ) рассчитать дозу облучения критического для данного пути поступления органа депонирования плутония, а по ней – величину годового избыточного радиационного риска на календарный год контроля облучения от поступивших соединений плутония.

Для оценки суммарных доз облучения при воздействии на работника нескольких источников, а также для учета доз в карточке учета индивидуальных доз работника, годовой избыточный риск, сформированный за счет облучения от поступления плутония, переводится в годовую эффективную дозу, равнозначную годовой эффективной дозе внешнего облучения.

Таким образом, МУ 2.6.5.078-2018 устанавливает требования к планированию, организации и проведению ИДК внутреннего облучения работников, занятых обращением с плутонием, в случаях поступления радионуклида в организм при стандартных условиях и при отклонении от нормальных условий эксплуатации, а также к методам определения индивидуальных значений контролируемых при внутреннем облучении величин. Решение задачи контроля годового избыточного риска состоит из двух этапов:

- проведение измерений содержания плутония в выделениях или других пробах биологического происхождения;
- интерпретация результатов указанных измерений в терминах эквивалентных доз на критические органы, с использованием соответствующих моделей в рамках конкретных методик выполнения расчетов, и сопоставления их с предельными значениями, обеспечивающими не превышение приемлемой величины радиационного риска.

Целью первого этапа опытной эксплуатации МУ 2.6.5.078-2018 являлась отработка вопросов формирования группы работников для их включения в программу контроля для оценки предельно допустимых значений эквивалентных доз облучения критических органов и своевременного выявления превышения предельно допустимых значений эквивалентных доз облучения критических органов, формирующих годовой избыточный риск более  $1 \times 10^{-3}$ . Включению в программу контроля подлежали работники, у которых результат текущего, операционного или подтверждающего контроля показывает, что содержание плутония в СКМ превышает предел детектирования используемого метода измерения.

<sup>3</sup>МУ 2.6.1.065-2014 «Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования». М.: ФМБА России, 2018. 46 с. [Methodological guidelines MU 2.6.1.065-2014 "Dosimetric control of occupational internal radiation. General requirements". Moscow: FMBA of Russia; 2018. 46 p. (In Russ.)]

Для работников, подвергавшихся хроническому ингаляционному поступлению, рассматривались результаты текущего индивидуального дозиметрического контроля за период, начиная с 2010 г. Работники в указанный период времени должны были быть обеспечены несколькими индивидуальными обследованиями на содержание плутония в СКМ. Как минимум одно из таких обследований должно было выявить содержание плутония в СКМ выше предела обнаружения используемого метода измерения. Определение плутония в биологических пробах выполнялось согласно МВИ «Методика измерений активности изотопов плутония, америция и урана в пробах биосубстратов альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой»<sup>4</sup>. Задействованный метод анализа позволяет определять активность <sup>239</sup>Pu в СКМ на уровне 0,5 мБк.

Для учета зависимости коэффициента риска от возраста, в котором формируется доза внутреннего облучения,

в группе для анализа должны были присутствовать работники в широком диапазоне возрастов на дату формирования облучения.

На основании анализа результатов текущего индивидуального дозиметрического контроля персонала ФГУП «ПО «Маяк» была сформирована группа работников в количестве 44 человек, в пробах биосубстратов которых на протяжении всех периодов контроля, начиная с 2010 г., были выявлены содержания плутония выше предела обнаружения метода измерения. Структура группы в разрезе занятости на том или ином производстве представлена в таблице 1.

Распределение представителей группы по основным подразделениям радиохимического и плутониевого производств представлено на рисунке 1. В дальнейшем подразделение производства, к которому относился работник, учитывалось в системе оценки доз внутреннего облучения, как характеризующее тип поступающих соединений плутония по скорости перехода из легких в кровь.

Таблица 1. Распределение представителей группы по производствам ФГУП «ПО «Маяк»

[Table 1. Distribution of the group's representatives by production of FSUE Mayak PA]

Производство [Production]	Количество работников [Number of workers]
Радиохимическое [Radiochemical Production]	20
Плутониевое [Plutonium Production]	18
Приборно-механический завод [Instrument and Mechanical plant]	2
Радиоизотопное [Radioisotope production]	2
Центральная заводская лаборатория [Central Plant Laboratory]	2
Всего [Total]	44

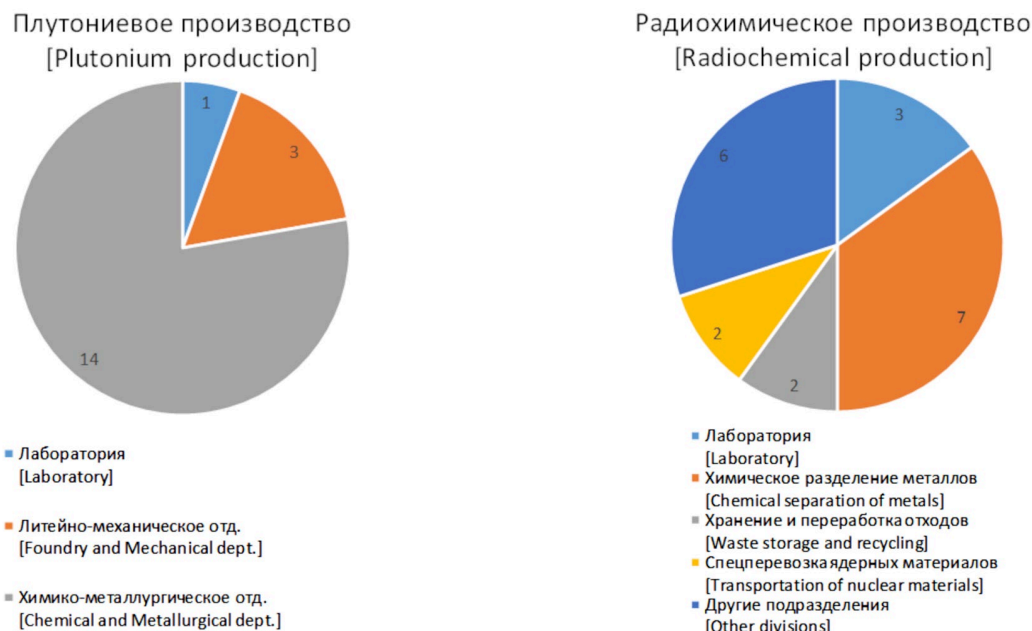


Рис. 1. Распределение работников по подразделениям производств

[Fig. 1. Distribution of employees by production divisions]

<sup>4</sup> СП-26-3-2023 Методика измерений активности изотопов плутония, америция и урана в пробах биосубстратов альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой (Свидетельство об аттестации № 26-3РА.RU.311952-2024). Озерск, 2023. 25 с. [SP-26-3-2023 A method for measuring the activity of plutonium, americium and uranium isotopes in biosubstrate samples using the alpha spectrometric method with radiochemical preparation (Certificate of Attestation No. 26-3РА.RU.311952-2024). Ozyorsk; 2023. 25 p. (In Russ.)]

Возраст получения дозы внутреннего облучения от инкорпорированного плутония, а также продолжительность контакта с альфа-излучающими аэрозолями, являются одними из основных параметров, включенных в алгоритм

оценки индивидуального риска согласно МУ 2.6.5.078-2018. Структура группы по указанным параметрам представлена на рисунках 2 и 3.

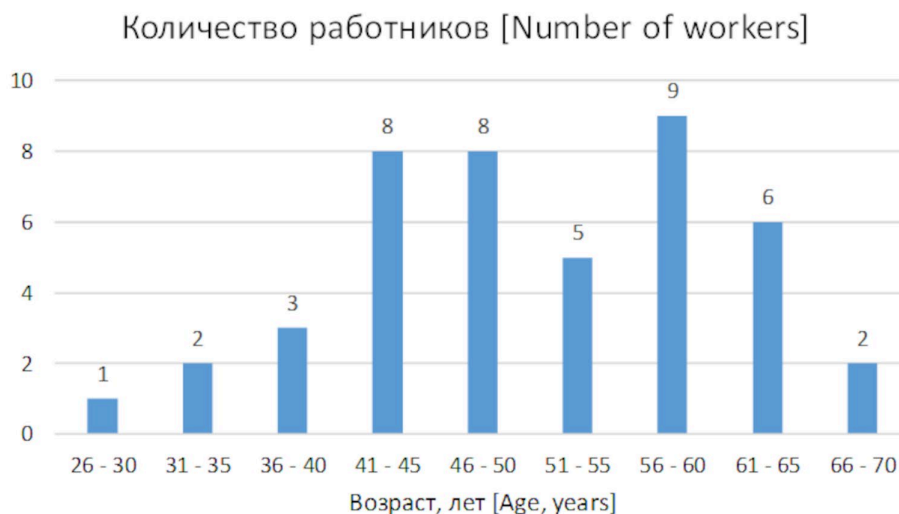


Рис. 2. Распределение работников по возрасту на момент последнего обследования или дату увольнения  
[Fig. 2. Distribution of employees by age at the time of the last survey or the date of resignation]



Рис. 3. Распределение работников по стажу на момент последнего обследования или дату увольнения  
[Fig. 3. Distribution of employees by duration of employment at the time of the last survey or the date of resignation]

Как следует из данных рисунков 2 и 3, представители группы принадлежат широкому диапазону значений возраста на момент облучения и продолжительности контакта с аэрозолями плутония. Большинство работников начали профессиональную деятельность в возрасте до 30 лет. Сведения о возрасте начала профессиональной деятельности для лиц, включенных в сформированную группу, представлены на рисунке 4.

Распределение числа работников по количеству индивидуальных обследований, охватывающий весь трудовой

стаж, представлено на рисунке 5.

На рисунке 6 представлены сведения о распределении продолжительности периодов контроля в сформированной группе за период, начиная с 2010 г. Под периодом контроля понимается промежуток времени между двумя последовательными индивидуальными обследованиями. Как следует из данных рисунка 6, наибольшее количество периодов контроля методом биофизического обследования укладывается в диапазон, рекомендуемый МУ 2.6.1.065-2014.



Рис. 4. Распределение работников по возрасту на момент начала работы  
[Fig. 4. Distribution of employees by age of starting work]



Рис. 5. Распределение количества работников по количеству обследований  
[Fig. 5. Distribution of the number of employees by the number of surveys]



Рис. 6. Распределение количества периодов контроля по частоте их проведения  
[Fig. 6. Distribution of the number of control periods by their frequency]

**Результаты**

Для всех представителей сформированной группы персонала ФГУП «ПО «Маяк» по результатам индивидуальных обследований для каждого периода контроля работника были рассчитаны значения ожидаемых эффективных доз внутреннего облучения за 50 лет (далее – ОЭД(50)), обусловленных поступлением плутония. Для 44 включенных в исследование работников общее количество периодов контроля составило 151. Расчеты выполнялись с использованием программного обеспечения ММК-02, реализующего методику радиационного контроля «Методика расчета эффективной дозы внутреннего облучения персонала по результатам измерений активности радионуклидов в теле человека и в биопробах» и рекомендованные публикациями № 66 и 67 МКРЗ [5, 6] модели биокинетики актинидов.

При расчетах ОЭД(50) в отсутствии фактических данных об условиях облучения были приняты следующие условия:

- тип соединения при ингаляции – «П» (промежуточные) или «М» (медленные) в зависимости от профмаршрута работника;
- медианный по активности аэродинамический диаметр аэрозоля (АМАД) – 1 мкм;
- однократное поступление, момент поступления случайный, равновероятно распределенный в пределах периода контроля.

Исходными данными для расчета являлись результаты регулярных измерений скорости выведения плутония из организма, определенной путем измерения активности плутония в СКМ. Для работников с результатами измерений содержания плутония в пробах СКМ ниже предела обнаружения (Lc) метода измерения было использовано значение предела обнаружения содержания плутония в пробах СКМ.

Обобщенные результаты расчетов в виде распределения приписанных к периоду контроля значений ОЭД(50) внутреннего облучения, обусловленного хроническим ингаляционным поступлением плутония, представлены на рисунке 7.



Рис. 7. Распределение значений ОЭД(50) [Fig. 7. Distribution of CEDE (He,50)]

Как следует из данных рисунка 7, за все рассмотренные периоды контроля в большинстве случаев были зарегистрированы поступления, которые привели к формированию доз внутреннего облучения выше уровня регистрации. Зарегистрированные значения ОЭД(50) для представителей сформированной группы персонала не превысили установленные НРБ-99/2009 пределы доз.

На основании данных ИДК профессионального внутреннего облучения были выполнены расчеты дозиметрических величин, используемых при применении риск-ориентированного подхода к оценке радиационного воздействия, а именно годовых эквивалентных доз на критические органы для рассматриваемого пути поступления. Значения годовой эквивалентной дозы на критические органы при поступлении плутония через органы дыхания представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения пределов годовой эквивалентной дозы на критические органы при ингаляционном поступлении плутония

[Table 2. The values of the annual equivalent dose limits for critical organs with inhaled plutonium intake]

Тип соединения [Type of compound]	Критический орган [Critical organ]	Значение ПД, Н <sub>год</sub> <sup>крит.орган</sup> , мЗв Limit of H(T, 1), mSv
«М» (медленные) [“S” (slow)]	Легкие [Lung]	60
«П» (промежуточные) [“M” (medium)]	Печень [Liver]	135

При выполнении оценок использовалась методика, изложенная в МУ 2.6.5.078-2018, согласно которой эквивалентные дозы на критические органы оцениваются с использованием биокинетических моделей дозиметрической системы «MWDS-2008» [7] и на основании данных о содержании радионуклида в СКМ при различных сценариях поступления плутония в организм работника. Расчеты выполнялись в соответствии с требованиями положений МУ 2.6.5.078-2018 по расчету эквивалентных доз на критические органы по результату измерения активности плутония в СКМ, годового избыточного риска и переводу годового избыточного

риска в величину годовой эффективной дозы. Обобщенные результаты расчетов в виде распределения значений годовых эквивалентных доз на критические органы представлены на рисунке 8.

Как следует из данных рисунка 8, на большинстве периодов контроля значения эквивалентных доз на критические органы не превышали установленных пределов. В течение семи периодов контроля были зарегистрированы эквивалентные дозы на критические органы выше 60 мЗв. Сведения об указанных случаях представлены в таблице 3.

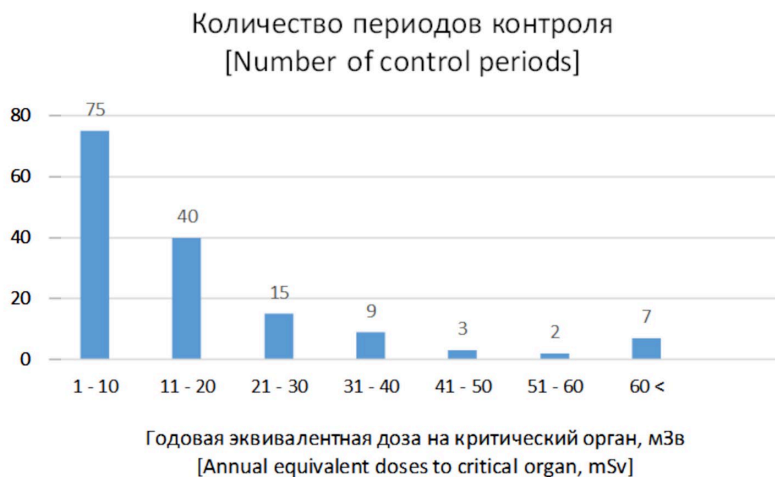


Рис. 8. Распределение значений годовых эквивалентных доз на критический орган [Fig. 8. Distribution of annual equivalent doses to critical organ]

Таблица 3. Сведения о случаях превышения эквивалентных доз на критические органы [Table 3. Information on cases of excess of equivalent doses to critical organs]

Номер случая [Case number]	Год начала работы [Year of employment start]	Год контроля [Year of monitoring]	Возраст на год контроля, лет [Age for the year of control, years]	Тип соединения [Type of compound]	Критический орган [Critical organ]	Эквивалентная доза на критический орган, мЗв [Equivalent dose for critical organ, mSv]
75520	1992	2014	45			65
61290	1978	2015	55	П [M]	Печень [Liver]	63
		2016	56			100
82720	1985	2015	53			120
		2017	55			81
84884	1997	2015	39	М [S]	Легкое [Lung]	110
		2021	44			100

Как следует из данных таблицы 3, у одного работника (случай 84884) из контролируемой группы, контактирующего с труднорастворимыми соединениями плутония, было зарегистрировано превышение предела годовой эквивалентной дозы на легкие, при этом годовой избыточный риск за год контроля не превышал  $1 \times 10^{-3}$ .

На рисунке 9 представлено распределение значений годового избыточного риска за годы контроля среди работников контролируемой группы.

Для всех работников контролируемой группы, подвергавшихся хроническому ингаляционному поступлению плутония, ни в один из периодов контроля не было зарегистрировано превышения приемлемой величины годового избыточного риска.

На рисунке 10 представлено сравнение результатов контроля с использованием подхода НРБ-99/2009, нормирующего при внутреннем облучении значение ОЭД(50), и риск-ориентированного подхода, ограничивающего значение годового избыточного риска за каждый год контроля (на рисунке 10 обозначен как ELR). В группу сравнения включены случаи, в которых работники контролировались ежегодно на протяжении нескольких лет подряд.



Рис. 9. Распределение значений годового избыточного риска [Fig. 9. Distribution of annual excess risk values]

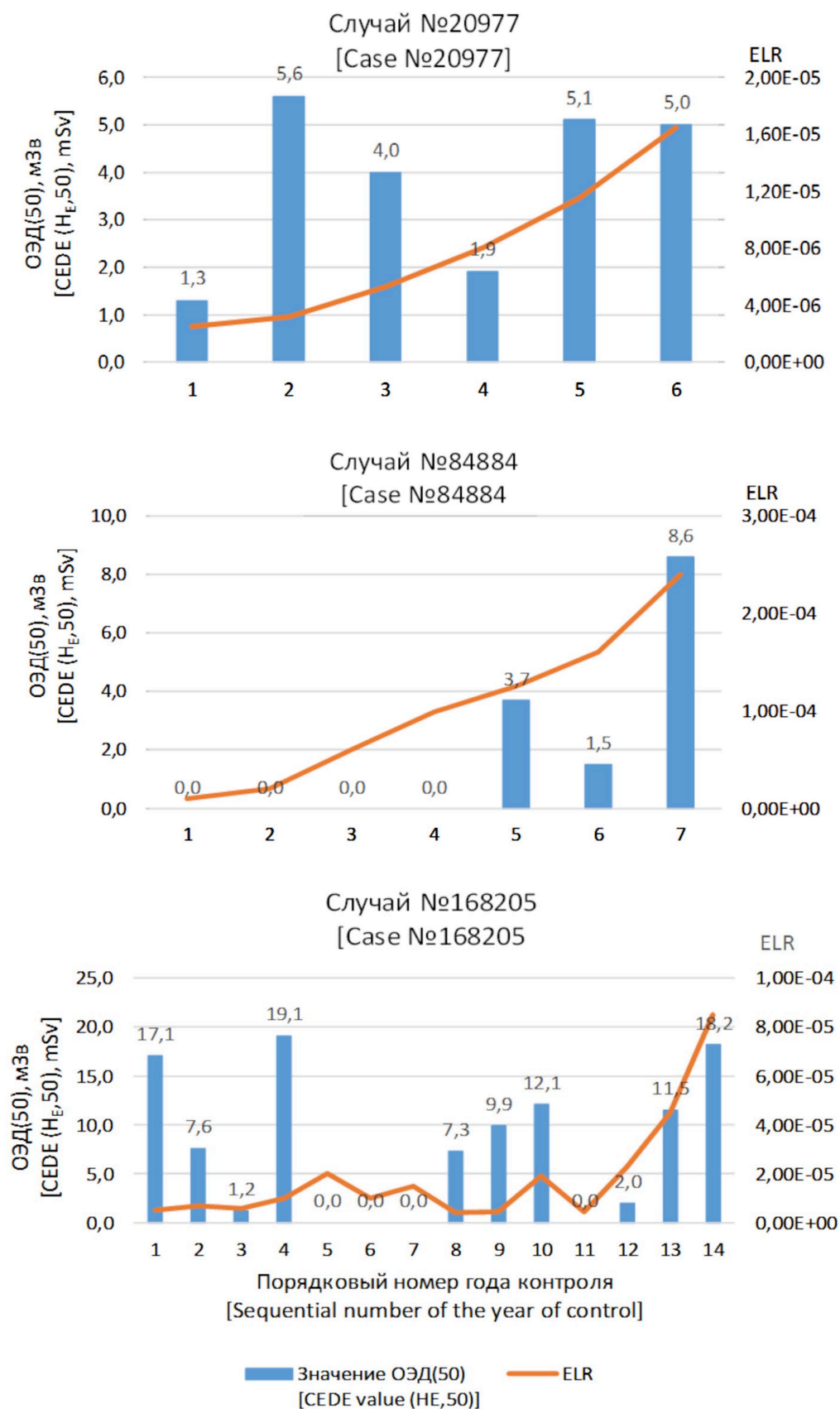


Рис. 10. Сравнение результатов контроля в терминах ОЭД(50) и годового избыточного риска [Fig. 10. Comparison of control results in terms of CEDE (H<sub>E,50</sub>) and ELR]

Как следует из данных рисунка 10, значения контролируемых величин при рассматриваемых подходах к нормированию внутреннего облучения от плутония не превышают установленных пределов. Для случая №168205 при контроле облучения в терминах ожидаемой эффективной дозы отмечены периоды контроля, в которых значение ОЭД(50) приближалось к пределу дозы, равному 20 мЗв, тогда как величины годового избыточного риска оставались много ниже установленного предела в  $1 \times 10^{-3}$ .

### Обсуждение

Для целей апробации алгоритмов риск-ориентированного подхода к контролю профессионального внутреннего облучения, обусловленного инкорпорацией плутония, в соответствии с положениями МУ 2.6.5.078-2018 были сформированы группы персонала, подлежащие специальному контролю.

В группе персонала ФГУП «ПО «Маяк», подвергавшегося облучению в контролируемых условиях, превышенной приемлемой величины годового избыточного риска за периоды контроля не выявлено. Значение указанного показателя было много ниже установленного в Нормах радиационной безопасности предела увеличения пожизненного риска смерти от онкологических заболеваний, связанных с действием ионизирующего излучения. Вместе с тем в этой же группе были отмечены случаи, когда величина годовой дозы при монофакторном воздействии приближалась к значению предела, установленного НРБ-99/2009.

Выполненная тестовая эксплуатация МУ 2.6.5.078-2018 показывает практическую применимость изложенных в документе методик оценки радиационного воздействия. Практическое применение положений МУ 2.6.5.078-2018 позволило выявить недостатки апробируемого подхода и сформулировать предложения о необходимости выполнить детализацию ряда алгоритмов расчета для достижения универсальности в интерпретации широкого разнообразия случаев индивидуальных программ обследования, когда отсутствуют компьютерные программы для расчетов параметров облучения, а их оценки можно выполнить только по табулированным данным со значительной дискретностью.

### Заключение

В целях улучшения системы радиационной защиты и ограничения доз внутреннего облучения работников плутониевых производств Госкорпорации «Росатом» посредством установления дозовых пределов, поддерживающих радиационный риск на социально приемлемом уровне, установленном в НРБ-99/2009, специалистами ФГБУН ЮрФНКЦ МБ ФМБА России выполнена опытная эксплуатация МУ 2.6.5.078-2018 на базе результатов ИДК профессионального внутреннего облучения персонала ФГУП «ПО «Маяк».

Широкому внедрению разработанных и апробированных МУ 2.6.5.078-2018 будет способствовать также внедрение разработанного в ФГБУН ЮрФНКЦ МБ ФМБА России регламента (типового порядка) ИДК внутреннего облучения, основанного на риск-ориентированном подходе, и разработка компьютерных программ, реализующих алгоритмы формирования групп контроля и интерпретацию результатов индивидуальных обследований.

Внедрение разработанных МУ 2.6.5.078-2018 и Регламента в практику на предприятиях и учреждениях Госкорпорации «Росатом», а также в лабораториях дозиметрии внутреннего облучения ФМБА России, является важным этапом создания системы контроля внутреннего облучения персонала при поступлении плутония, отвечающей требованиям принципов радиационной безопасности, установленных НРБ-99/2009.

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

Ефимов А.В. – общее научное руководство исследованием, разработка дизайна исследования, определение цели и задачи, систематизация, подготовка и анализ первичных материалов исследования, написание текста статьи.

Сокольников М.Э. – проведение расчетов и анализ полученных оценок годового избыточного риска.

Соколова А.Б. – анализ источников информации, выборка данных, обобщение и обработка материалов исследования, редактирование текста статьи.

Ишунина М.В. – подготовка, анализ и систематизация результатов индивидуального дозиметрического контроля персонала.

Аладова Е.Е. – подготовка, анализ и систематизация данных об условиях и истории облучения персонала.

### Благодарности

Авторы признательны А.В. Аклееву (генеральному директору ФНКЦ РБ ФМБА России) за общее и научное руководство. Авторы благодарны рецензентам за проделанную работу.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке ФМБА России в рамках выполнения прикладной научно-исследовательской работы: шифр «ИДК ГХК 25».

### Литература

1. Василенко Е.К., Сокольников М.Э., Востротин В.В. и др. Ограничение профессионального облучения при ингаляционном поступлении плутония // Радиация и риск. 2015. Т.24, № 3. С. 51-58.
2. Аладова Е.Е., Василенко Е.К., Ефимов А.В. и др. Методология нормирования внутреннего облучения от плутония: проблемы и пути решения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67, № 6. С. 36–43. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-36-43.
3. Gilbert E.S., Sokolnikov M.E., Preston D.L. et al. Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort // Radiation Research. 2013. Vol. 179, No 3. P. 332-342. DOI: 10.1667/RR3054.1.
4. Ефимов А.В., Соколова А.Б. История и программа биофизических обследований в эпидемиологической когорте работников ФГУП «ПО «Маяк» // Радиация и риск. 2024. Т. 33, № 4. С. 131-143. DOI: 10.21870/0131-3878-2024-33-4-131-143.
5. ICRP Publication 66 Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // Annals of the ICRP. 1994. Vol. 24, No 1-3. P. 8-120.

6. ICRP Publication 67 Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. // Annals of the ICRP. 1993. Vol. 23, No 3-4. P. 121-140. plutonium activity in urine // Health Physics. 2013. Vol. 104, No 4. P. 366-378. DOI: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60. Поступила: 01.09.2025
7. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G. et al. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of internal dose from measurement results of

---

**Ефимов Александр Владимирович** – начальник научно-исследовательского отдела радиационной безопасности, научный сотрудник 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: ephimov@subi.su  
ORCID: 0000-0003-1110-6559

**Сокольников Михаил Эдуардович** – доктор медицинских наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией исследований онкологических эффектов профессионального облучения Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия  
ORCID: 0000-0001-9492-4316

**Соколова Александра Борисовна** – кандидат биологических наук, главный научный сотрудник, курирующий вопросы радиационной безопасности Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия  
ORCID: 0000-0002-6036-4178

**Ишунина Мария Владимировна** – заведующий научно-исследовательской лабораторией радиационных измерений, младший научный сотрудник Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия  
ORCID: 0000-0002-0737-4131

**Аладова Елена Евгеньевна** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Южно-Уральского регионального аварийного медико-дозиметрического центра Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия  
ORCID: 0000-0003-3277-0512

**Для цитирования: Ефимов А.В., Сокольников М.Э., Соколова А.Б., Ишунина М.В., Аладова Е.Е. Аprobация алгоритмов риск-ориентированного подхода к контролю профессионального внутреннего облучения при поступлении соединений плутония // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 91–101. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-91-101**

---

## **Approbation of algorithms for a risk-based approach to the control of professional internal exposure to plutonium compounds**

**Alexander V. Efimov, Mikhail E. Sokolnikov, Alexandra B. Sokolova, Mariya V. Ishunina, Elena E. Aladova**

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

*The relevance of the work is due to the need to improve the methods of control of professional internal exposure due to incorporated radionuclides with a long biological half-life. The aim of the work was to test a methodical document regulating the organization of internal exposure control due to plutonium based on a risk-based approach to limiting radiation exposure to personnel. The task of the work was a practical application of the method of interpretation of the results of individual dosimetric control in monitoring the annual increment of the lifetime excess risk of death from radiation-induced cancer. Materials and Methods: The control system is based on the principle of limiting the doses of radiation to plutonium storage organs, depending on the age at which the exposure occurred, and the permissible levels of plutonium exposure make it possible not to exceed the acceptable level of the radiation-related risk throughout the work experience. Based on an array of data from individual dosimetric monitoring of 44 employees of the Mayak production association, calculations of annual equivalent doses to critical organs were performed, and the radiation effect on personnel was estimated based on the expected effective dose. Results and Discussion: In most cases, during the control periods, admissions were recorded that led to the formation of internal radiation doses above the registration level. The registered values of the expected effective doses for fifty years, as well as the values*

---

**Alexander V. Efimov**

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

**Address for correspondence:** 19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: ephimov@subi.su

of equivalent doses for critical organs, did not exceed the established limits. In seven cases, the equivalent doses to critical organs were higher than 60 mSv, while the annual excess risk for the year of control did not exceed  $1 \times 10^{-3}$ . For all employees of the controlled group, no excess of the acceptable annual risk was recorded in any of the control periods. Conclusion: The completed test operation of the methodological guidelines showed the practical applicability of the methods described in the document, made it possible to identify the shortcomings of the tested approach and formulate proposals for improving the calculation algorithms.

**Key words:** plutonium compounds, radiation risk, internal exposure, individual dosimetry monitoring, committed effective dose equivalent.

### Authors' personal contribution

Efimov A.V. – general scientific management of research, development of research design, definition of goals and objectives, systematization, preparation and analysis of primary research materials, writing the text of the article.

Sokolnikov M.E. – carrying out calculations and analyzing the estimates of radiation risk.

Sokolova A.B. – analysis of information sources, data sampling, synthesis and processing of research materials, editing of the text of the article.

Ishunina M.V. – preparation, analysis and systematization of the results of individual dosimetric control of personnel.

Aladova E.E. – preparation, analysis and systematization of data on the conditions and history of personnel exposure.

### Acknowledgements

The authors are grateful to A.V. Akleev (General Director of the Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the FMBA of Russia) for general and scientific guidance. The authors thank to the reviewers for their work.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

### Sources of funding

The work was carried out with the financial support of the FMBA of Russia as part of the applied research work: code "IDK GHK 25".

### References

1. Vasilenko EK, Sokolnikov ME, Vostrotnin VV, Efimov AV, Aladova EE, Romanov SA. Limitation of occupational exposure to inhaled plutonium. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2015;24(3): 51-58. (In Russian).
2. Aladova EE, Vasilenko EK, Efimov AV, Vostrotnin VV, Sokolnikov ME, Romanov SA. Methodology for Rationing Internal Exposure from Plutonium: Problems and Solution. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2022;67(6): 36-43. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-36-43.
3. Gilbert ES, Sokolnikov ME, Preston DL, Schonfeld SJ, Schadilov AE, Vasilenko EK, et al. Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort. *Radiation Research*. 2013;179(3): 332-342. DOI: 10.1667/RR3054.1.
4. Efimov AV, Sokolova AB. History and program of biophysical examinations in the epidemiological cohort of employees of FSUE "Mayak PA". *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2024;33(4): 131-143. (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2024-33-4-131-143.
5. ICRP Publication 66 Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. *Annals of the ICRP*. 1994;24(1-3): 8-120.
6. ICRP Publication 67 Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. *Annals of the ICRP*. 1993;23(3-4): 121-140.
7. Khokhryakov VV, Khokhryakov VF, Suslova KG, Vostrotnin VV, Vvedensky VE, Sokolova AB, et al. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of internal dose from measurement results of plutonium activity in urine. *Health Physics*. 2013;104(4): 366-378. DOI: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60.

Received: September 01, 2025

**For correspondence: Alexander V. Efimov** – Head of Department, Researcher, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency (Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: ephimov@subi.su

ORCID: 0000-0003-1110-6559

**Mikhail E. Sokolnikov** – Doctor of Medical Sciences, Head of the Research Laboratory for Research on Oncological Effects of occupational radiation, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0001-9492-4316

**Alexandra B. Sokolova** – Candidate of Biological Sciences, Chief Researcher in charge of radiation safety issues, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0002-6036-4178

**Mariya V. Ishunina** – Head of Radiation Measurement Laboratory, Junior Researcher, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0002-0737-413

**Elena E. Aladova** – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Southern Ural Regional Emergency Medical Dosimetric Center, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0003-3277-0512

**For citation: Efimov A.V., Sokolnikov M.E., Sokolova A.B., Ishunina M.V., Aladova E.E. Approbation of algorithms for a risk-based approach to the control of professional internal exposure to plutonium compounds. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 91–101. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-91-101**

## Прогноз мощности дозы гамма-излучения на основе математических моделей миграции $^{137}\text{Cs}$ в почве

Голиков В.Ю.

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

*Работа посвящена построению модели прогноза дозы гамма-излучения от радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  +  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , поступивших в окружающую среду воздушным путем в результате крупномасштабной радиационной аварии. На основе существующих аналитических моделей миграции цезия с одной стороны и натурных данных о вертикальном распределении цезия в почвах территорий, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС с другой, был построен прогноз мощности дозы гамма-излучения в воздухе над открытой местностью. База экспериментальных данных содержала 180 профилей из Брянской области Российской Федерации и около 100 профилей, включая глобальные, из Баварии (Германия). Для аппроксимации распределения радионуклида в почве использовали решения конвективно-диффузионного уравнения и логнормальное распределение. Наилучшим образом реальным распределениям радионуклида в почве соответствовали  $\chi^2$  распределение, являющееся решением конвективно-диффузионного уравнения с возрастающим коэффициентом диффузии и логнормальное распределение. Для обоих распределений были найдены зависимости параметров (скорость диффузионного проникновения и скорость направленного движения с почвенной влагой) от времени. В предположении универсальности этих зависимостей, предложен способ их восстановления во времени, например, на основе один раз отобранных профилей глобальных выпадений. Были рассчитаны значения мощности поглощенной дозы в воздухе до 50 лет после выпадений. Среднее отличие экспериментальных данных, выраженных в виде отношения мощности дозы в воздухе на высоте 1 м над почвой от профиля радионуклидов ( $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ ) +  $^{134}\text{Cs}$  в момент времени  $t$  к мощности дозы в воздухе для радионуклидов, расположенных на поверхности почвы от расчетных, составляло для Брянской области 9 %, а для Баварии 14 %. Расчетные значения мощности поглощенной дозы в воздухе верифицированы с помощью результатов ее измерений в Брянской области в период времени 3-24 года после выпадений. Они совпадали с измеренными значениями в пределах 95 % интервала погрешности измерений во всем временном промежутке измерений за исключением 8-го года после аварии, что подтверждает адекватность использовавшихся в работе распределений радионуклида в почве.*

**Ключевые слова:** миграция цезия, пробы почвы, доза гамма-излучения, конвективно-диффузионное уравнение, логнормальное распределение.

### Введение

Аварии на Чернобыльской и Фукусимской АЭС явились причиной дополнительного радиоактивного загрязнения обширных территорий и повышенного облучения миллионов людей на них проживающих [1–5]. Несмотря на существенное время, прошедшее с момента аварий и комплекс контрмер, осуществляемых на этих территориях с целью снижения доз облучения жителей, целый ряд вопросов, связанных с возвращением к нормальной жизнедеятельности на этих территориях, с оказанием жителям дополнительной медицинской, социальной и другой помощи со стороны государства требуют принятия научно-обоснованных решений. В связи с этим, представляется актуальным и практически значимым рассмотрение вопросов, связанных с построением модели долгосрочного прогноза дозы внешнего облучения жителей, проживающих на радиоактивно загрязненных территориях.

Как правило, в качестве базовой модели внешнего облучения человека в окружающей среде используют модель облучения над открытым целинным участком почвы [6, 7]. В этом случае на величину мощности дозы в воздухе оказывают влияние только естественные факторы, основным из которых, кроме радиоактивного распада, является миграция радионуклидов в почве. Рассмотрение вертикальной миграции радионуклидов в почве в качестве конвективно-диффузионного процесса значительно упрощает построение долговременного прогноза поведения радионуклидов в естественных условиях. Для описания вертикальной миграции радиоактивной примеси в почве использовались зависимости, являющиеся решениями конвективно-диффузионного уравнения [8] и логарифмически нормальное распределение, отражающее стохастическую природу миграции [9, 10, 11]. Если принять, что перемещение радиоактивной примеси по профилю почвы проходит с эффективными средними параметрами  $D$  (скорость диффузионного проникновения, возникающая благодаря существованию градиента концентрации от поверхности вглубь почвы) и  $v$  (скорость

Голиков Владислав Юрьевич

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

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

направленного движения с почвенной влагой), то поведение концентрации радиоактивной примеси  $C(x,t)$  описывается конвективно-диффузионным уравнением (1):

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - v \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - \lambda C(x,t) \quad (1)$$

где  $t$  – время,  $x$  – глубина в почве и  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада радионуклида.

**Цель исследования** – построение долгосрочного прогноза мощности дозы гамма-излучения на открытой местности на базе существующих аналитических моделей миграции цезия с одной стороны и натурных данных о вертикальном распределении цезия в почвах территорий, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, с другой.

**Материалы и методы**

Отбор проб почвы и измерения мощности поглощенной дозы в воздухе выполнялись в 1987–2010 гг. в юго-западных районах Брянской области РФ, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Данные, используемые в этой работе, были получены в ходе полевых исследований на участках почвы, отобранных для проведения мониторинга [2, 7, 12, 13]. Эти участки почвы располагались на расстоянии 160 – 220 км от Чернобыльской АЭС на высоте 130 – 190 м над уровнем моря. Климат данного региона умеренный со среднегодовой температурой 6,5°С и среднегодовым количеством осадков 585 мм. Все почвенные площадки можно отнести к категории целинной почвы, т.к. согласно имевшейся информации они не вспахивались после аварии на Чернобыльской АЭС. Площадки для отбора проб почвы являлись достаточно ровными, без явно выраженного уклона. Тип почв на сухих площадках – дерново-подзолистые песчаные и супеси. На увлажняемых

участках тип почв был представлен дерново-подзолистыми глеевыми легкосуглинистыми почвами и аллювиальными супесчаными почвами. Эти почвы характеризуются кислой реакцией и низким содержанием минеральных питательных элементов [14, 15].

Для отбора проб выбирали участок с ненарушенным почвенным покровом, удаленный от дорог, зданий, деревьев. В центре участка размечали квадрат со стороной 10 м, в центре и углах которого пробоотборниками отбирали 5 проб. В 1987-1988 гг. пробу поверхностного слоя почвы толщиной 4 см и площадью 100 см<sup>2</sup> разрезали на два равных слоя. В 1989-2010 гг. цилиндрические пробы почвы площадью 20 см<sup>2</sup> и высотой 10 - 20 см разрезали на 5-10 слоев. Соответствующие слои от каждой из 5-ти проб объединяли, образуя репрезентативную пробу для данной глубины. Активность <sup>137</sup>Cs в пробах измеряли с помощью стационарного сцинтилляционного детектора NaI(Tl). Спектрометры были откалиброваны по образцовым источникам объемной активности <sup>137</sup>Cs. Статистическая погрешность результатов измерений не превышала ±3 %, а систематическая погрешность ±10 %.

В результате все имеющиеся экспериментальные данные были объединены в базу данных. Фрагмент этой базы данных, дающий представление о структуре ее полей, приведен в таблице 1, где в первом столбце показан порядковый номер профиля; во втором - дата его взятия; в третьем - название места, где брался профиль; в четвертом - число дней, прошедших после радиоактивных выпадений; в пятом столбце приведена поверхностная активность пробы в Бк/см<sup>2</sup>. В следующих 10-ти столбцах содержится массовая толщина слоя в г/см<sup>2</sup>. Далее приведена массовая концентрация активности в каждом слое в Бк/кг. Последнее поле отведено для пометок о пригодности поля для последующего анализа, ибо имелись профили, взятые со вспаханной территории и не несущие полезной информации.

Таблица 1. Фрагмент структуры базы данных в отношении отобранных профилей почвы

[Table 1. Fragment of the database structure in relation to the selected profiles]

№ [No]	Дата отбора [Date]	Нас. пункт [Settlement]	Дни [Days]	Пов. акт., Бк/см <sup>2</sup> [Surf act., Bq/cm <sup>2</sup> ]	L1, г/см <sup>2</sup> [g/cm <sup>2</sup> ]	L2, г/см <sup>2</sup> [g/cm <sup>2</sup> ]	L3, г/см <sup>2</sup> [g/cm <sup>2</sup> ]	...	L10, г/см <sup>2</sup> [g/cm <sup>2</sup> ]	Cs1, Бк/кг [Bq/kg]	Cs2, Бк/кг [Bq/kg]	Cs3, Бк/кг [Bq/kg]	...	Cs10, Бк/кг [Bq/kg]	Исп., Да/нет [Use Y/N]
188	13.07.90	Новозыбков [Novozybkov]	1539	79,2	1,38	2,46	3,87	.....	13,28	7844	9250	9240	.....	1669	Да [Y]
189	13.07.90	Новозыбков [Novozybkov]	1539	78,5	1,35	2,89	4,33	.....	15,60	7881	7955	7067	.....	259	Да [Y]
190	06.09.90	Ущерпье [Ushcherpie]	1594	89,9	1,03	1,92	2,85	.....	11,57	20905	18093	15318	.....	592	Да [Y]
191	13.09.90	Веприно [Veprino]	1601	88,8	0,88	1,53	2,58	.....	9,76	23754	33744	20091	.....	148	Да [Y]

Решение уравнения (1) для точечного источника в случае однократного поступления загрязнения активностью  $C_0$  на поверхность почвы с постоянным по глубине коэффициентом диффузии  $D$  и скоростью конвективного переноса  $v$  будет представлять собой нормальное распределение (2) [11]:

$$C(x,t) = \frac{C_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{4Dt} - \lambda t\right) \quad (2)$$

Попытки учесть неоднородность почвы по глубине были сделаны в работах [16, 17]. В природных условиях коэффициент диффузии с увеличением глубины не остается постоянным. На изменение коэффициента диффузии с глубиной оказывают влияние влажность, механический состав почв, состояние и формы нахождения нуклидов в почвах и др. Рост коэффициента диффузии с глубиной может быть представлен в виде формулы (3) [16, 17]:

$$D_x = D_1 \left( \frac{x}{x_1} \right)^k + D_0, k > 0 \quad (3)$$

где  $D_0$  и  $D_1$  – значения коэффициента диффузии на поверхности почвы и его приращение на фиксированной глубине, соответственно.

Если принять  $D_0=0$ ,  $k=1$ , а  $D_1/x_1=v_d$ , то проникновение примеси от загрязненной поверхности под действием

$$C(x,t) = \frac{C_0}{v_d \cdot t \cdot \Gamma(1+\nu)} \left( \frac{x}{v_d \cdot t} \right)^\nu \exp \left( -\lambda \cdot t - \frac{x}{v_d \cdot t} \right) \quad (5)$$

где  $\Gamma(1+\nu)$  – гамма-функция;

$v_d$  – эффективная скорость, определяемая диффузией;

$\nu = v/v_d$  – отношение эффективной скорости за счет конвективного переноса к эффективной скорости, определяемой диффузией.

Также исследовалась экспоненциальная зависимость, которая является решением конвективно-диффузионного уравнения с линейно возрастающим эффективным коэффициентом диффузии  $D$  и нулевой скоростью конвективного переноса (6) [16]:

$$C(x,t) = C_0 \frac{1}{v_d \cdot t} e^{-\frac{x}{v_d \cdot t}} \quad (6)$$

Кроме того, для описания профилей радиоактивного загрязнения использовалась модель, описываемая логнормальным распределением (7)[11]:

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2x \cdot \sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{(\ln x - \ln vt)^2}{4Dt}} \quad (7)$$

где  $D$  и  $v$  – параметры, характеризующие соответственно среднюю эффективную скорость диффузии и среднюю эффективную скорость конвективного переноса.

Для обработки экспериментальных профилей по вышеупомянутым моделям использовалась программная реализация метода наименьших квадратов в рамках математического пакета Mathcad 15.0 [18]. Также использовался визуальный контроль соответствия экспериментального профиля теоретической кривой. Информация по обработанному профилю записывалась в базу данных. Для каждой модели записывались значения параметров (место отбора профиля, время отбора профиля, отношение эффективной скорости за счет конвективного переноса к эффективной

диффузионной скорости проникновения  $v_d$  и конвективной скорости  $v$  будет описываться уравнением (4) [16]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_d x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C \quad (4)$$

Решение этого уравнения для однократного поступления примеси имеет вид распределения  $\chi^2$  (5)[16]:

скорости, определяемой диффузией, эффективная скорость, определяемая диффузией), значение минимума суммы квадратов отклонений ( $S$ ), коэффициент корреляции ( $K$ ) и графический вид зависимости в линейном и полулוגарифмическом масштабе. Пример записи данных представлен на рисунке 1.

Выбор наилучшей модели проводился как по наименьшему значению, усредненной по всем профилям суммы квадратов отклонений, так и по гибкости в описании различных вариантов профилей, контролируемой визуально. В результате выбирались модели, наилучшим образом описывающие экспериментальные данные. После чего ставился вопрос о временной зависимости параметров, их описывающих. Кроме данных о миграции Чернобыльских выпадений в Брянской области для выявления временной зависимости параметров модели использовали профили Чернобыльских и глобальных выпадений из Баварии (Германия) [6, 7, 19] и 9 профилей глобальных выпадений из Сахалина [20, 21].

Расчет значений мощности поглощенной дозы  $D$  гамма-излучения в воздухе на высоте 1 м над землей от радионуклида, испускающего гамма-излучение с энергией  $E$ , с произвольным распределением активности в почве  $C(x,t)$  проводился с помощью соотношения (8):

$$D(E,t) = \int_0^\infty C(x,t) \cdot K(E,x) dx \quad (8)$$

где  $K(E,x)$  – коэффициент перехода от поверхностной активности плоского источника, расположенного в почве на глубине  $x$  ( $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}$ ) к мощности поглощенной дозы в воздухе ( $\text{нГр}\cdot\text{час}^{-1}$ )/( $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ ), а  $C(x,t)$  – удельная активность ( $\text{кБк}\cdot\text{г}^{-1}$ ) радионуклида на глубине  $x$  в момент времени  $t$ .

Аналитическая зависимость функции  $K(E,x)$  для гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  +  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  была получена ранее путем аппроксимации ее значений в диапазоне глубин  $x$  от 0 до 100  $\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$  в почве стандартного состава (формула (9)) [22, 23]:

$$K(0,66,x) = 1,22 \cdot \exp(-0,49 \cdot x) + 0,86 \cdot \exp(-0,072 \cdot x) \quad (9)$$

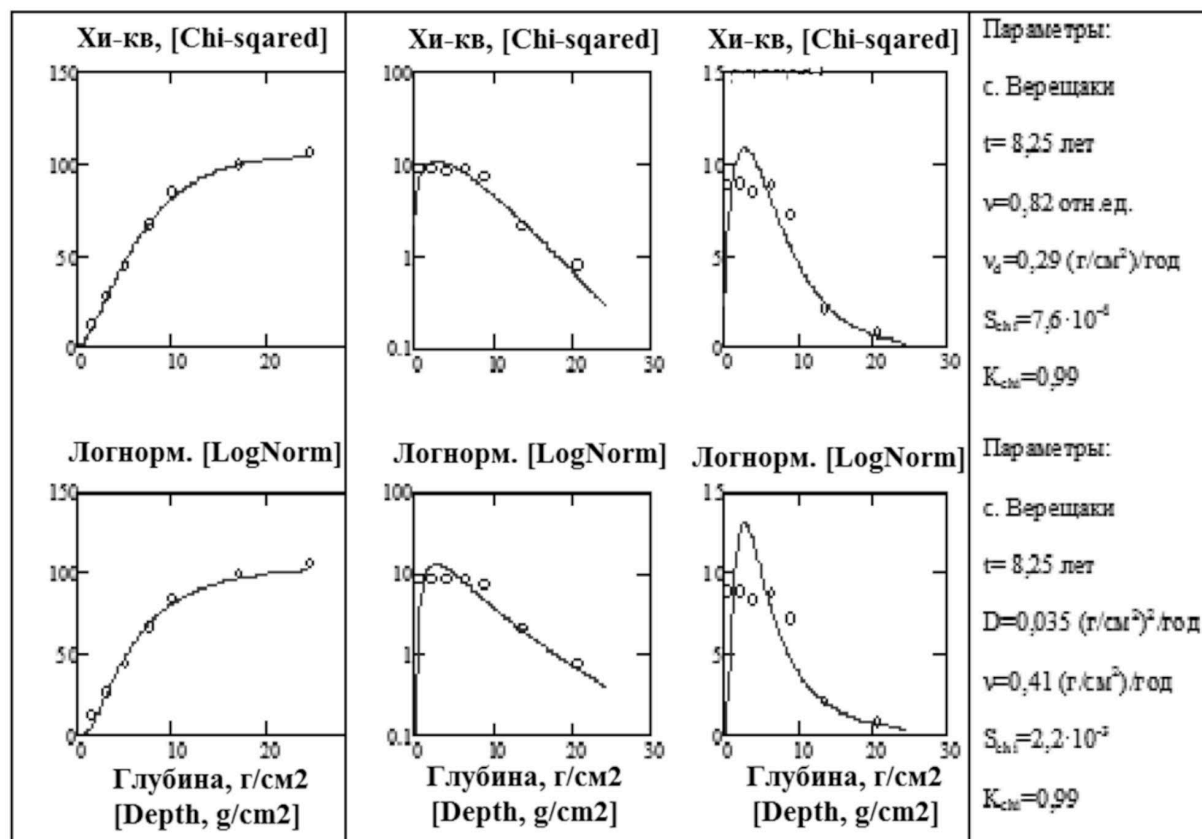


Рис. 1. Пример записи в базе данных о параметрах моделей. По оси ординат в первой колонке «Кумулятивная поверхностная активность» в Бк/см<sup>2</sup>, во второй (полулогарифмический масштаб) и третьей (линейный масштаб) – «Концентрация» в Бк/г  
[Fig. 1. An example of the database entry for model parameters. The ordinate axis displays "Cumulative Surface Activity" in Bq/cm<sup>2</sup> in the first column, and "Concentration" in Bq/g in the second (semi-logarithmic scale) and third (linear scale)]

### Результаты и обсуждение

Каждый экспериментальный профиль проходил проверку по трем зависимостям в рамках конвективно-диффузионной модели и по логнормальному распределению, описанным ранее. Особенностью данного исследования являлось использование кумулятивных распределений. Этот способ избавлял от необходимости предопределять точку средней концентрации внутри каждого слоя почвы, чтобы потом сравнивать ее с аналогичной точкой на теоретической

кривой, а позволял сравнивать кумулятивное содержание радионуклида на определенной глубине с соответствующим значением расчетного кумулятивного распределения.

После обработки всех профилей, включая глобальные, по всем моделям ставилась задача оставить для дальнейшего анализа распределения, наилучшим образом описывающие экспериментальные наблюдения. Для этого вычислялись средние значения минимума суммы квадратов для каждой модели и их разброс относительно среднего значения. Эти величины представлены в таблице 2.

Таблица 2. Среднее значение минимума суммы квадратов для разных моделей распределения радионуклида в почве  
[Table 2. Average values of the minimum sum of squares for different models of radionuclide distribution in soil]

Модель [Model]	Среднее значение минимума суммы квадратов [The mean value of the minimum sum of squares]	Стандартное отклонение от среднего значения [Standard deviation from the mean]
Экспоненциальное [Exponential]	0,024	0,037
Нормальное [Normal]	0,010	0,013
$\chi^2$ [Chi-sq.]	0,004	0,009
Логнормальное [Lognormal]	0,007	0,012

По данным таблицы 2 и после проведения визуального контроля соответствия рассматриваемых моделей экспериментальным данным, в качестве моделей для дальнейшей работы были выбраны модель с линейно возрастающим эффективным коэффициентом диффузии, описываемая распределением  $\chi^2$  и логнормальное распределение. В процессе визуального контроля, были выявлены следующие свойства других распределений, описывающих соответ-

ствующие модели. Экспоненциальное распределение удовлетворительно описывало только профили, взятые на почве, где мала эффективная скорость конвективного переноса, что оправдывает эту модель как частный случай модели на основе распределения  $\chi^2$  при нулевой эффективной скорости конвективного переноса. Типичный случай неспособности этой модели описать профиль приведен на рисунке 2.

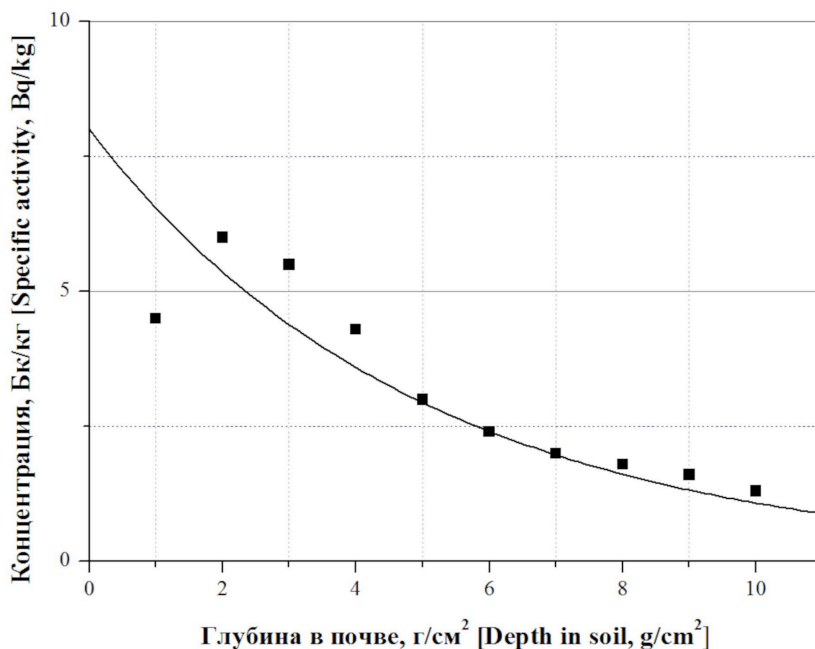


Рис. 2. Недостатки модели описываемой экспоненциальным распределением  
[Fig.2. Disadvantages of the model described by the exponential distribution]

Модель, описываемая нормальным распределением, имела слишком резкий спад, что особенно хорошо заметно в полулогарифмическом масштабе. Это отрицательное

качество нормального распределения показано на рисунке 3, на котором также приведено распределение  $\chi^2$ , хорошо описывающее данный профиль.

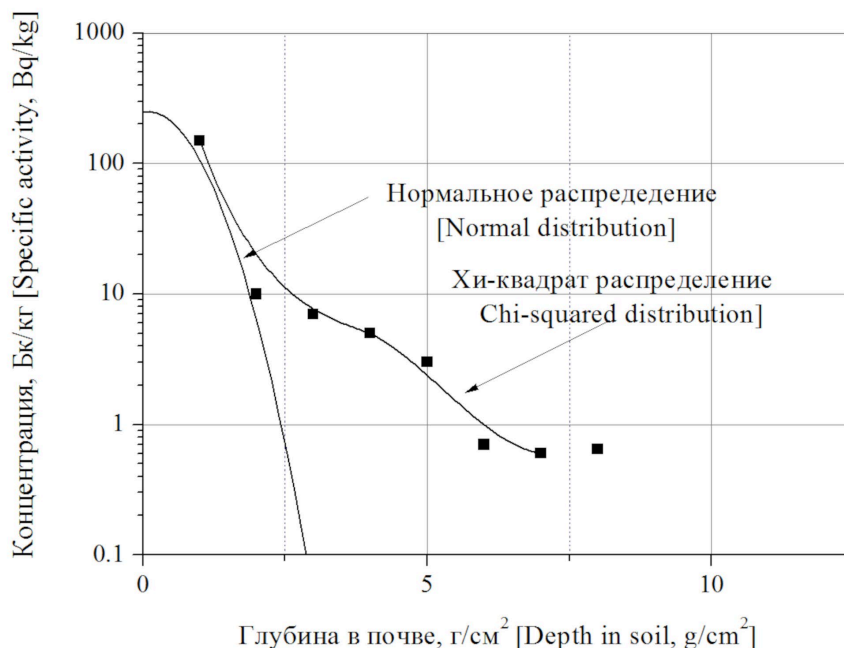


Рис. 3. Недостатки модели, описываемой нормальным распределением  
[Fig.3. Disadvantages of the model described by the normal distribution]

После того, как были выбраны две оптимальные из четырех рассматриваемых моделей, исследовали зависимость их параметров от времени. В данной работе не ставился вопрос влияния свойств почвы, водного режима и температурных условий на процесс миграции радиоактивного загрязнения. Поэтому, дифференциация параметров, характеризующих выбранную модель, производилась только по времени, а по остальным характеристикам, производилось усреднение.

Для анализа данных по Брянской области было выбрано 9 временных интервалов, соответствующих времени отбора проб почвы (3–24 года после выпадений). В анализ были включены 180 профилей, каждый из которых анализировался для оценки параметров  $V$ ,  $D$ ,  $V_d$  и  $\varphi$ , соответствующих логнормальной и  $\chi^2$  моделям распределения радионуклида в почве. На рисунке 4 представлены зависимости от времени параметров  $V$  и  $V_d$  и параметра  $D$  для Брянской области.

Аналогичная процедура была выполнена для 91 чернобыльского профиля отобранных в Баварии в течение 0,4–7 лет после выпадений и 11 профилей глобальных выпадений из Баварии возрастом 30 лет [6, 7]. Для них были установлены аналогичные временные зависимости параметров.

Профили глобальных выпадений на Сахалине отбирались через 48 лет после пика глобальных выпадений в 1963 году. Это была одна временная точка. Для того, чтобы полностью восстановить зависимость параметров сахалинских глобальных выпадений от времени нами было предположено, что за-

висимости от времени  $V \sim \frac{const_1}{\sqrt{t}}$  и  $D \sim \frac{const_2}{t}$  имеют универсальный характер, а региональные различия определяются только значением констант.

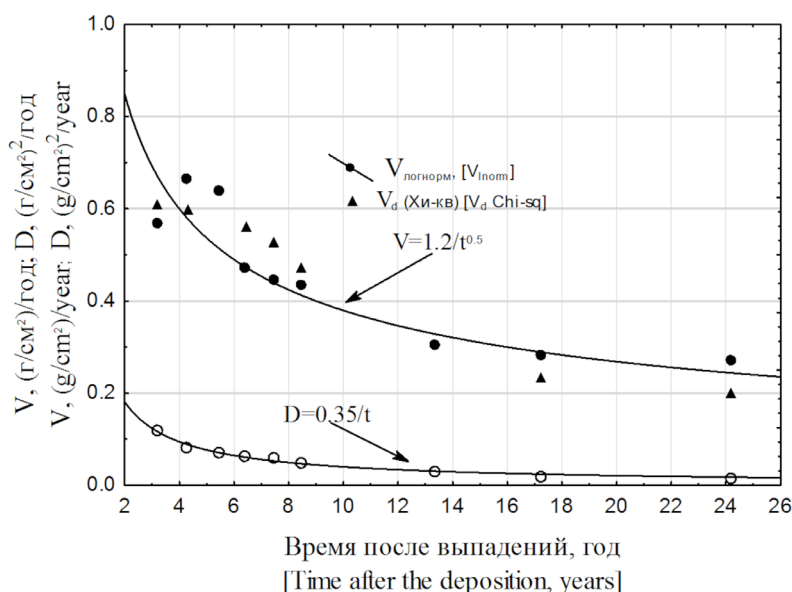


Рис. 4. Зависимости от времени параметров  $V$ ,  $V_d$  и  $D$  для Брянской области  
[Fig.4. Time dependences of parameters  $V$ ,  $V_d$  and  $D$  for the Bryansk region]

Тогда для сахалинских глобальных выпадений, отбирившихся при  $t = 48$  лет, значения  $const_1 = V(\text{лет}) \cdot \sqrt{48}$ , а  $const_2 = D(\text{лет}) \cdot 48$ . Отметим, что на аналогичный под-

ход экстраполяции параметров  $V$  и  $D$  логнормального распределения радиоактивной примеси по времени ранее было указано в работах [10, 11]. Окончательный вид зависимостей от времени параметров моделей для трех рассматриваемых в этой работе регионов приведен в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость от времени параметров моделей распределения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвах регионов, рассматриваемых в настоящей работе

[Table 3. Time dependence of the parameters of the distribution models of the radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  in the soils of the regions considered in this work]

Регион [Region]	Распределение [Distribution]			
	Логнормальное [Lognormal]		Хи-квадрат [Chi-squared]	
	$V$	$D$	$V_d$	$\varphi$
Брянская обл. [Bryansk region]	$1,2 / \sqrt{t}$	$0,35/t$	$1,2 / \sqrt{t}$	0,5
Бавария [Bavaria]	$2,1 / \sqrt{t}$	$0,225/t$	$1,1 / \sqrt{t}$	1,3
Сахалин [Sakhalin]	$0,55 / \sqrt{t}$	$0,35/t$	$0,42 / \sqrt{t}$	0,75

Для расчета мощности поглощенной дозы в воздухе интегралы (8) брались численно. Были рассчитаны ее значения над открытым целинным участком почвы на период времени до 50 лет после радиоактивных выпадений. Для сравнения с данными реальных измерений поглощенных доз в воздухе при расчетах учитывалось присутствие радионуклида  $^{134}\text{Cs}$  в соотношении 0,56 к выброшенной активности  $^{137}\text{Cs}$ . Результаты расчетов для трех рассматриваемых регионов (Брянская область РФ, Сахалин и Бавария) в виде отношения мощности дозы в воздухе на высоте 1 м над почвой от профиля радионуклидов  $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$  в момент времени  $t$  к мощности дозы в воздухе для радионуклидов, расположенных на поверхности почвы,  $(D(t)/D_{\text{пов}})$  представлены на рисунке 5. На этом же рисунке представлены средние экспериментальные значения  $D(t)/D_{\text{пов}}$  ( $\pm$  среднеквадратичное отклонение), полученные в ходе проведения радиационного мониторинга на территориях Брянской области РФ [2, 6, 7] и Баварии (Германия) [6, 7], загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, а также значение  $D(t)/D_{\text{пов}}$  через 30 лет после пика глобальных выпадений, оцененное на основании профилей активности цезия глобального происхождения, измеренных в Баварии [6, 7, 19]. Непосредственно видно хорошее

совпадение результатов модельных расчетов и экспериментальных данных. Среднее различие экспериментальных данных от расчетных составляет для Брянской области 9 %, а для Баварии – 14 %. Расчетные данные отношений  $D(t)/D_{\text{пов}}$  различаются для разных регионов, имея минимальные значения для Баварии и максимальные для Сахалина. Однако, для каждого региона в отдельности данные, полученные по двум рассматриваемым моделям распределения радионуклида в почве (Хи-квадрат и логнормальное распределение), практически совпадают между собой. Более того, полагая степенные временные зависимости параметров моделей миграции не зависящими от региона и от типа почв [11], можно определить их численные константы, которые зависят от региона, с помощью отбора, например, профиля глобальных выпадений, как это было продемонстрировано в этой работе на примере глобальных выпадений на Сахалине. После этого восстановить временную зависимость распределения радионуклида цезия и рассчитать прогнозные значения мощности дозы гамма-излучения при его единичном выбросе в окружающую среду в данном регионе. Такой подход, например, можно использовать для прогнозирования радиационной обстановки при проектировании и строительстве АЭС.

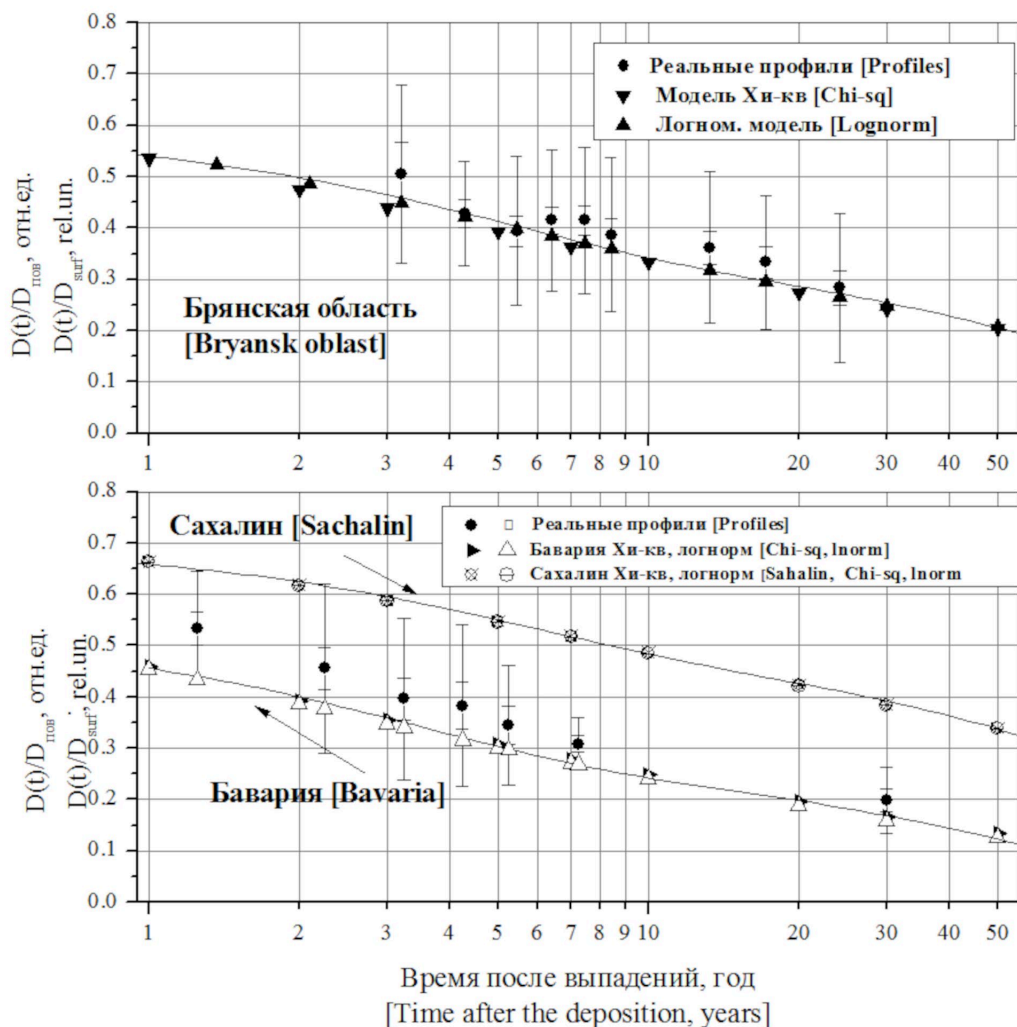


Рис. 5. Отношение мощности дозы в воздухе на высоте 1 м над почвой от профиля радионуклидов  $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$  в момент времени  $t$  к мощности дозы в воздухе для радионуклидов, расположенных на поверхности почвы

[Fig. 5. The ratio of the dose rate in the air at a height of 1 m above the soil from the profile of radionuclides  $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$  at time  $t$  to the dose rate in the air for radionuclides located on the soil surface]

В качестве верификации предлагаемых моделей распределения активности радионуклидов цезия в почве на рисунке 6 представлены результаты сравнения измеренных значений мощности дозы гамма-излучения над открытыми целинными участками почвы в Брянской области в течение 24 лет после аварии на Чернобыльской АЭС с расчетными данными в соответствии с логнормальной моделью распределения радионуклида. Измерение мощности дозы гамма-излучения проводили на высоте 1 м от поверхности земли с помощью дозиметра гамма-излучения ДРГ-01Т [24]. Приборы данного класса позволяют измерять мощность поглощенной дозы в воздухе

(нГр/час<sup>-1</sup>) гамма-излучения с энергией в диапазоне 0,05–3 МэВ при значениях от 50 нГр/час<sup>-1</sup>. Относительная статистическая погрешность среднего значения мощности дозы не превышала 10 %.

Как видно из данных, представленных на рисунке 6, расчетные значения мощности дозы гамма-излучения от радионуклидов <sup>137</sup>Cs+<sup>134</sup>Cs совпадают с измеренными значениями в пределах 95 % интервала погрешности измерений во всем временном промежутке измерений, за исключением восьмого года после аварии, что подтверждает адекватность предлагаемых распределений радионуклида в почве.

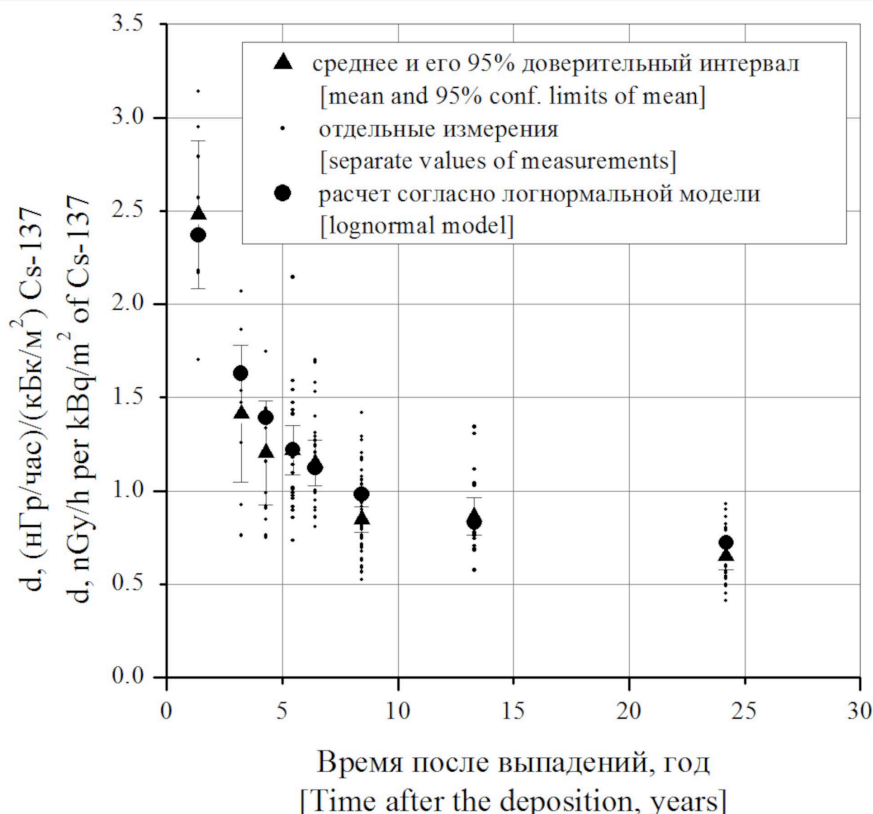


Рис. 6. Измеренные и расчетные значения мощности поглощенной дозы в воздухе над открытыми целинными участками почвы в Брянской области в течение 24 лет после аварии на Чернобыльской АЭС

[Fig. 6. Measured and calculated values of the absorbed dose rate in the air above open virgin soil areas in the Bryansk region for 24 years after the Chernobyl accident]

### Заключение

На основе существующих аналитических моделей миграции цезия с одной стороны и натуральных данных о вертикальном распределении цезия в почвах территорий, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС с другой, был построен прогноз мощности дозы гамма-излучения в воздухе над открытой местностью. Наилучшим образом реальным распределениям радионуклида в почве соответствовали  $\chi^2$  распределение, являющееся решением конвективно-диффузионного уравнения с возрастающим коэффициентом диффузии и логнормальное распределение. Для обоих распределений были найдены зависимости параметров (скорость диффузионного проникновения и скорость направленного движения с почвенной влагой) от времени и

в предположении универсальности этих временных зависимостей предложен способ их восстановления на основе отбора профилей распределения активности в почве, например, от глобальных выпадений, в какой-то один момент времени. Рассчитаны мощности поглощенной дозы в воздухе до 50 лет после выпадений. Расчетные значения мощности поглощенной дозы в воздухе верифицированы с помощью результатов ее измерений в Брянской области в период времени 3–24 года после выпадений.

### Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. De Cort M., Dubois G., Fridman Sh.D. et al. Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. European Commission report EUR 16737, Luxembourg, 1998.
2. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Ponomarev A.V. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Eds. Balonov M.I. and Merwin S.E. The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises, Publishing Segment. Richland, Washington, 1993. P. 247-288.
3. International Atomic Energy Agency. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group. Vienna: IAEA, 2006.
4. World Health Organization. Health Risk Assessment from the Nuclear Accident After the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Based on a Preliminary Dose Estimation (World Health Organization, Geneva), 2013. URL: [www.who.int/iris/bitstream/10665/78218/1/9789241505130\\_eng.pdf](http://www.who.int/iris/bitstream/10665/78218/1/9789241505130_eng.pdf) (Дата обращения: 01.09.2025).
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2013. Sources and Effects of Ionizing Radiation (2013 Report to the General Assembly, with Annexes), Annex A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan earthquake and tsunami. New York: United Nations; to be published, 2013.
6. Jacob P., Prohl G., Likhtarev I.A., et al. Pathway analysis and dose distributions. European Commission, Brussels: EUR 16541 EN, 1996. 130 p.
7. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident // Radiation Environmental Biophysics. 2002. Vol. 41, No 10. P. 185-193.
8. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. М.: Энергоиздат, 1981. 98 С.
9. Kirchner G. Migration of fallout radionuclides in soil // Health Physics, 1998. Vol. 74, No 1. P. 78-65.
10. Konshin O.V. Mathematical model of <sup>137</sup>Cs migration in soil: Analysis of observations following the Chernobyl accident // Health Physics. 1992. Vol. 63, No 3. P. 301-306.
11. Konshin O.V. Applicability of the convection-diffusion mechanism for modeling migration of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in the soil // Health Physics. 1992. Vol. 63, No 3. P. 291-300.
12. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R. et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 85. P. 205–227.
13. Рамзаев В.П., Голиков В.Ю. Сравнение расчетных и измеренных значений мощности кермы в воздухе над почвой, загрязненной <sup>137</sup>Cs // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 42–51.
14. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Balonov M.I. et al. Cesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystem and estimation of internal doses to the population. In: The Chernobyl Papers. Vol. I. Eds. by S.E. Merwin and M.I. Balonov. Richland: Research Enterprises, 1993. P. 167-218.
15. Kaduka M.V., Shutov V.N., Bruk G.Ya. et al. Soil-dependent uptake of <sup>137</sup>Cs by mushrooms: experimental study in the Chernobyl accident areas // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 89. P. 199–211.
16. Махонько К.П. Вид профилей концентрации продуктов деления в почве при глобальных и локальных выпадениях. В сб. Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Выпуск 18. Л.: Колос, 1969. С. 48-56.
17. Махонько К.П., Чумичев В.Б. О проникновении некоторых продуктов деления в почву. В сб. Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Выпуск 18. Л.: Колос, 1969. С. 57-74.
18. Mathcad 15.0 Parametric Technology Corporation, 2012. URL: <http://www.ptc.com/product/mathcad/> (Дата обращения: 01.09.2025).
19. Schimmack W., Steindl H., Bunzl K. Variability of water content and of depth profiles of global fallout Cs in grassland soils and the resulting external gamma-dose rates // Radiation and Environmental Biophysics. 1998. Vol. 37. P. 27–33.
20. Ramzaev V., Barkovsky A., Goncharova Yu. et al. Radiocesium fallout at the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to the Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011 // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 118. P. 128–142.
21. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Громов А.В. и др. Фукусимские выпадения в Сахалинской области России. Сообщение 1: <sup>137</sup>Cs и <sup>134</sup>Cs в луговых почвах // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 25-42. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-1-25-42>.
22. Golikov V., Barkovsky A., Kulikov V. et al. Gamma ray exposure due to sources in the contaminated forest. In: Linkov I., Schell W.R. (Eds.), Contaminated Forests. NATO Science Series (Series 2: Environmental Security). Dordrecht, Springer, 1999. Vol. 58. P. 333–341.
23. Golikov V.Yu. Air kerma rate from radionuclides distributed in forest ecosystem // Journal of Environmental Radioactivity. 2023. Vol. 270, No 1. P. 107283.
24. Дозиметр ДРГ-01Т1. Паспорт. ГБ2.805.002 ПС. URL: [http://dosimeter.ucoz.ru/Ebay/DRG\\_01T1.pdf](http://dosimeter.ucoz.ru/Ebay/DRG_01T1.pdf) (Дата обращения: 01.09.2025).

Поступила: 09.09.2025

**Голиков Владислав Юрьевич** – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: [sg235@rambler.ru](mailto:sg235@rambler.ru)  
ORCID: 0009-0003-5494-2300

**Для цитирования:** Голиков В.Ю. Прогноз мощности дозы гамма-излучения на основе математических моделей миграции <sup>137</sup>Cs в почве // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 102–112. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-102-112

## Forecast of gamma radiation dose rate based on mathematical models of $^{137}\text{Cs}$ migration in soil

Vladislav Yu. Golikov

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 work is devoted to the study of the possibility of predicting the gamma dose rate from  $^{137}\text{Cs}$  +  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  radionuclides that fell into the environment as a result of a large-scale radiation accident. Based on existing analytical models of cesium migration on the one hand and natural data on the vertical distribution of cesium in the soils of areas contaminated as a result of the Chernobyl accident on the other, a forecast of the dose rate of gamma radiation in the air over open areas was constructed. The experimental database contained 180 profiles from the Bryansk region of the Russian Federation and about 100 profiles, including global ones, from Bavaria (Germany). To approximate the radionuclide distribution in the soil, solutions of the convective-diffusion equation and the lognormal distribution were used. The best fit to the real distributions of the radionuclide in the soil was the  $\chi^2$  distribution, which is a solution of the convective-diffusion equation with an increasing diffusion coefficient, and the lognormal distribution. For both distributions, the dependences of the parameters (diffusion penetration rate and movement rate with soil moisture) on time were found. Assuming the universality of these dependences, a method for their reconstruction in time is proposed, for example, based on once selected profiles of global fallouts. The absorbed dose rate values in the air were calculated for up to 50 years after the fallout. The average difference between the experimental data, expressed as the ratio of the dose rate in the air at a height of 1 m above the soil from the profile of  $^{137}\text{Cs}$  +  $^{134}\text{Cs}$  radionuclides at time  $t$  to the dose rate in the air for radionuclides located on the soil surface from the calculated ones, was 9 % for the Bryansk region and 14 % for Bavaria. The calculated values of the absorbed dose rate in the air were verified using the results of its measurements in the Bryansk region in the period of 3–24 years after the fallout. They coincided with the measured values within 95 % of the measurement error interval throughout the entire measurement time period except for the 8th year after the accident, which confirms the adequacy of the radionuclide distributions in the soil used in the work.

**Key words:** cesium migration, soil samples, gamma radiation dose, convection-diffusion equation, lognormal distribution.

### Conflict of interests

The author declare no conflict of interest.

### Sources of funding

The study was not supported by sponsors.

### References

- De Cort M, Dubois G, Fridman ShD, Germenchuk M, Izrael YA, Janssens A, et al. Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. European Commission report EUR 16737. Luxembourg; 1998.
- Golikov VYu, Balonov MI, Ponomarev AV. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Eds. Balonov MI and Merwin SE. The Chernobyl Papers. Vol. 1. Research Enterprises, Publishing Segment, Richland; Washington; 1993. P. 247-288.
- International Atomic Energy Agency. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group. Vienna: IAEA; 2006.
- World Health Organization. Health Risk Assessment from the Nuclear Accident After the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Based on a Preliminary Dose Estimation (World Health Organization, Geneva). 2013. Available from: [www.who.int/iris/bitstream/10665/78218/1/9789241505130\\_eng.pdf](http://www.who.int/iris/bitstream/10665/78218/1/9789241505130_eng.pdf) [Accessed September 01, 2025].
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2013. Sources and Effects of Ionizing Radiation (2013 Report to the General Assembly, with Annexes), Annex A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan earthquake and tsunami. New York: United Nations; to be published, 2013.
- Jacob P, Prohl G, Likharev IA, Kovgan L, Gluvchinsky R, Perevoznikov O, et al. Pathway analysis and dose distributions. European Commission, Brussels: EUR 16541 EN. 1996; 130 p.
- Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Radiation Environmental Biophysics*. 2002;41(10): 185-193.
- Prokhorov VM. Migration radionuclides in soil. Moscow: Energoizdat; 1981. 98 p.
- Kirchner G. Migration of fallout radionuclides in soil. *Health Physics*. 1998;74(1): 78-65.
- Konshin OV. Mathematical model of  $^{137}\text{Cs}$  migration in soil: Analysis of observations following the Chernobyl accident. *Health Physics*. 1992;63(3): 301-306.
- Konshin OV. Applicability of the convection-diffusion mechanism for modeling migration of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the soil. *Health Physics*. 1992;63(3): 291-300.
- Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahooe KS, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.
- Ramzaev VP, Golikov VYu. Comparison of calculated and measured values of air kerma rate over soil contaminated with  $^{137}\text{Cs}$ . *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 42-51. (In Russian).
- Shutov VN, Bruk GYa, Balonov MI, Parhomenko VI, Pavlov IY. Cesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystem and estimation of internal doses to the

Vladislav Yu. Golikov

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

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

- population. In: The Chernobyl Papers. Vol. I. Eds. by SE Merwin and MI Balonov, Research Enterprises, Richland; 1993. P. 167-218.
15. Kaduka MV, Shutov VN, Bruk GYa, Balonov MI, Brown JE, Strand P, et al. Soil-dependent uptake of <sup>137</sup>Cs by mushrooms: experimental study in the Chernobyl accident areas. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;89: 199–211.
  16. Mahonko KP. View of fission product concentration profiles in soil during global and local fallout. In: Radioactive isotopes in soils and plants. Issue 18. Leningrad: Publishing office «Kolos»; 1969. P. 48-56.
  17. Mahonko KP, Chumichev VB. On the penetration of some fission products into the soil. In: Radioactive isotopes in soils and plants. Issue 18. Leningrad: Publishing office «Kolos»; 1969. P. 57-74.
  18. Mathcad 15.0. Parametric Technology Corporation, 2012. Available from: <http://www.ptc.com/product/mathcad/> [Accessed September 01, 2025].
  19. Schimmack W, Steindl H, Bunzl K. Variability of water content and of depth profiles of global fallout Cs in grassland soils and the resulting external gamma-dose rates. *Radiation and Environmental Biophysics*. 1998;37: 27–33.
  20. Ramzaev V, Barkovsky A, Goncharova Yu, Gromov A, Kaduka M, Romanovich I. Radiocesium fallout at the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to the Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;118: 128–142.
  21. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Gromov AV, Ivanov SA, Kaduka MV. Fukushima fallout in Sakhalin Oblast of Russia. Report 1: <sup>137</sup>Cs and <sup>134</sup>Cs in meadow soils. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 25-42. (In Russian). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-1-25-42>.
  22. Golikov V, Barkovsky A, Kulikov V, Balonov M, Rantavaara A, Vetikko V. Gamma ray exposure due to sources in the contaminated forest. In: Linkov I, Schell WR (Eds.), Contaminated Forests. NATO Science Series (Series 2: Environmental Security). Dordrecht, Springer, 1999;58: 333–341.
  23. Golikov VYu. Air kerma rate from radionuclides distributed in forest ecosystem. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023;270(1): 107283. Available from: DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107283 [Accessed September 01, 2025].
  24. Dosimeter DRG-01T. Available from: [http://dosimeter.ucoz.ru/Ebay/DRG\\_01T1.pdf](http://dosimeter.ucoz.ru/Ebay/DRG_01T1.pdf) [Accessed September 01, 2025].

Received: September 09, 2025

**For correspondence: Vladislav Yu. Golikov** – Senior Researcher of the 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: sg235@rambler.ru)  
ORCID: 0009-0003-5494-2300

**For citation: Golikov V.Yu. Forecast of gamma radiation dose rate based on mathematical models of <sup>137</sup>Cs migration in soil. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1, P. 102–112. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-102-112**

## Факторы, влияющие на объёмную активность трития в моче жителей Озерска

Финашов Л.В., Востротин В.В.

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

*Производственное объединение «Маяк» является предприятием Государственной корпорации «Росатом», максимальные выбросы трития которого превосходят суммарные выбросы от всех остальных предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики Российской Федерации. Население города Озерска, проживающее вблизи Производственного объединения «Маяк», длительно подвергалось и продолжает подвергаться внутреннему облучению от трития. Целью работы является исследование факторов, воздействующих на объёмную активность трития в моче у жителей города Озерска, находящегося в зоне влияния Производственного объединения «Маяк», оценка ожидаемых эффективных годовых доз внутреннего облучения от трития. Материалы и методы: Производился отбор проб мочи в 2016, 2017, 2018, 2021 и 2023 годах у жителей Озерска. Всего было собрано 218 проб, в том числе у 58 детей. Измерение объёмной активности трития в моче проводилось с помощью Quantulus-1220. Для сбора данных о факторах, влияющих на уровни трития в моче жителей, было проведено анкетирование. Статистическая обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения Microsoft Excel и R. Результаты исследования и обсуждение: Уровни объёмной активности трития в моче жителей г. Озерска находились в диапазоне от 4 до 49 Бк/л. Создана многофакторная регрессионная модель, описывающая влияние факторов на объёмную активность трития в моче жителей при комбинированном пути поступления трития. Оценки ожидаемых эффективных доз жителей г. Озерска составляли менее 0,076 % от дозового предела 1 мЗв. Заключение: Исследование влияния ключевых факторов, воздействующих на объёмную активность трития в моче жителей, позволяет оценить реальные дозы внутреннего облучения и прогнозировать дозы при увеличении выбросов трития на предприятиях Государственной корпорации «Росатом», а также разработать подходы к ретроспективной оценке доз у населения.*

**Ключевые слова:** тритий, путь поступления, объёмная активность мочи, внутреннее облучение, население, ожидаемая эффективная доза, радиационная безопасность, производственное объединение «Маяк», многофакторная регрессионная модель.

### Введение

Тритий – радиоактивный изотоп водорода с высокой миграционной способностью, который быстро включается в обменные процессы животных и растений, мгновенно поступая во все звенья экологического кругооборота, оказывая значительное радиационное воздействие на население и окружающую среду, поэтому входит в список 7 наиболее опасных радионуклидов и включен в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования<sup>1</sup> [1]. Согласно информации из отчетов НПО «Тайфун»<sup>2</sup>, в период с 2014 по 2023 годы производственное объединение «Маяк» (ПО «Маяк») является предприятием Государственной корпорации «Росатом»

(ГК «Росатом») с максимальными выбросами трития в воздушную сферу, превосходящими суммарные выбросы от всех остальных предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики Российской Федерации: средние значения 1320 ТБк/год, с диапазоном от 1150 ТБк (2014 год) до 1530 ТБк (2019 год). Значимыми источниками поступления трития в окружающую среду в зоне влияния ПО «Маяк», являются озера Кызылташ (Водоем В-2) и Старое Болото (В-17), находящиеся внутри его санитарно-защитной зоны (СЗЗ). Водоем В-2 служит открытым хранилищем естественного происхождения жидких радиоактивных отходов (ЖРО). В 2021 г. объёмная активность (ОА) трития в воде озера В-2 составляла ~16 кБк/л, что привело в процессе испарения воды с поверхности к поступлению 196 ТБк трития

<sup>1</sup>Постановление правительства РФ № 1316-р от 08.07.2015 г. (с изменениями на 10 мая 2019 года) [Decree of the Government of the Russian Federation no. 1316-r of 08.07.2015 (as amended as of May 10, 2019) (In Russ.)]

<sup>2</sup>Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Научно-производственное объединение «Тайфун» (см. «Ежегодник «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств» 2003-2024 гг.) URL: <https://www.rpatyphoon.ru/products/pollution-media.php> (Дата обращения: 01.09.2025) [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Scientific and Production Association Typhoon (see "Annual Report on the Radiation Situation in Russia and Adjacent States" 2003-2024). Available from: <https://www.rpatyphoon.ru/products/pollution-media.php> [Accessed September 09, 2025] (In Russ.)]

**Финашов Леонид Викторович**

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

**Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: finashov@subi.su, finashov@sucmb.su

в воздух и поступлению 0,7 ТБк трития в воздух от прибрежных растений оз. Кызылташ, что превосходило суммарные выбросы трития от всех предприятий ГК «Росатом» РФ (179 ТБк) в данном году, кроме ПО «Маяк» [2, 3]. Средняя мощность выброса трития в атмосферу с акватории В-17, являющимся хранилищем тритиевых конденсатов с радиохимического производства, при испарении в 2021 г. оценивается в 290 ТБк [4]. Уровень годового поступления трития в окружающую среду от ПО «Маяк» и оз. Кызылташ, сопоставим с прогнозным уровнем поступления трития в окружающую среду в годы интенсивного обслуживания термоядерного реактора ИТЕР и прогнозных значений поступления трития при работе коммерческих термоядерных реакторов в будущем [2, 5].

В работе Е.Л. Телушкиной и С.Н. Демина, в период с 1981 по 1984 годы была проведена радиационно-гигиеническая оценка загрязнения внешней среды тритием и дозовых нагрузок на население в районе ПО «Маяк». Для определения ОА трития в моче у жителей населенных пунктов на расстоянии до 25 км от ПО «Маяк» и контрольного пункта, находящегося на расстоянии 50 км, произвели отбор 147 проб у детей в возрасте от 10 до 12 лет [6]. В заключительной работе Е.Л. Телушкиной с соавт. установлено, что ОА трития в моче жителей изменялась в зависимости от года исследования и была сопоставима с изменениями ОА трития в атмосферном воздухе, которая в значительной степени зависит от газоаэрозольных выбросов ПО «Маяк». Уровень ОА трития в моче жителей зависел от расстояния до ПО «Маяк»: на расстоянии до 10 км находился в диапазоне от 0,7 до 2,4 кБк/л и был в среднем статистически значимо в 2 раза выше ОА трития в моче жителей контрольного пункта, находящегося на расстоянии 70 км [7]. Однако ни в этих, ни в более поздних исследованиях не было представлено результатов моделирования, а также не исследовано влияние других факторов на ОА трития в моче населения [6–8].

Из вышеизложенного следует, что население города Озерска, проживающее вблизи ПО «Маяк», длительно подвергалось и продолжает подвергаться внутреннему облучению от трития. На 63-й сессии Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН) в документе R.715 «Биологические эффекты облучения от отдельных инкорпорированных радионуклидов» был предложен подход к мониторингу трития в окружающей среде вблизи предприятий, а также к мониторингу трития у отдельных людей, живущих на этих территориях. Указаны проблемы, связанные с надежностью эпидемиологических исследований из-за недостаточной статистической мощности и отсутствии информации о дозах облучения тритием у населения [9, 10].

Согласно данным, полученным на лабораторных животных и в исследовании на людях, обмен воды в организме является сложным процессом, имеющим сильную индивидуальную вариабельность, связанную с возрастом, полом, параметрами окружающей среды, количеством

мышечной ткани и наличием соматических патологий [11–13]. Одними из веществ, позволяющих оценить закономерности обмена воды в организме в экспериментальных и клинических исследованиях, являются оксиды трития и дейтерия, схожие по своим физическим и химическим свойствам с водой и отличающиеся относительной лёгкостью идентификации данных изотопов в жидкостях организма [11].

Таким образом, регулярный мониторинг ОА трития в моче жителей Озерска является актуальным и дает возможность оценить распределение уровней внутреннего облучения тритием и сопоставить его с дозовым пределом НРБ-99/2009 для населения, косвенно отследить динамику выбросов и сбросов трития ПО «Маяк», а также получить новые данные в ходе натурных исследований о факторах, влияющих на индивидуальную вариабельность водного обмена и уровень ОА радионуклида жителей, проживающих в условиях хронического поступления трития.

**Цель исследования** – исследование факторов, воздействующих на объемную активность трития в моче жителей города Озерска, находящегося в зоне влияния ПО «Маяк».

### Задачи исследования

1. Определение уровней ОА трития в моче жителей г. Озерска Челябинской области.
2. Выявление основных факторов, влияющих на ОА трития в моче жителей г. Озерска Челябинской области и создание многофакторной регрессионной модели.
3. Оценка годовых ожидаемых эффективных доз (ОЭД) внутреннего облучения от трития у населения г. Озерска и сравнение с дозовым пределом.

### Материалы и методы

Отбор проб мочи проводили в 2016, 2017, 2018, 2021 и 2023 году у жителей Озерска, профессионально не связанных с ПО «Маяк». Всего было собрано 218 проб (2016 г. – 30 проб, 2017 г. – 10 проб, 2018 г. – 13 проб, 2021 г. – 99 проб, 2023 г. – 66 проб), в том числе у 58 детей в возрасте от 2 до 17 лет (26 девочек и 32 мальчиков). Каждым участником исследования или его официальным представителем было подписано информированное согласие на участие в проводимом исследовании, а также согласие на обработку персональных данных. У каждого участника собраны анкетные данные. Для измерения ОА трития в моче были однократно отобраны утренние порции мочи в индивидуальные стерильные полипропиленовые контейнеры с завинчивающейся крышкой вместимостью 120 мл. Измерения ОА трития в моче были проведены в соответствии с методикой измерений (МИ)<sup>3</sup>, с пределом обнаружения 8 Бк/л, при измерении в течении 6 часов и относительной погрешностью  $\pm 40\%$  ( $P=0,95$ ) в диапазоне от 8 до 50 Бк/л [14]. Результаты измерения ОА трития в моче, оказавшиеся ниже предела обнаружения, обрабатывались как предварительные (то есть как есть) согласно Гост Р 572016-2016<sup>4</sup>.

<sup>3</sup>Методика выполнения измерения объёмной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220; ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики». Озерск, 2016; свидетельство об аттестации МИ № 222.0032/RA.RU.311866/2019 [Methods for measuring the volume activity of tritium in water and urine samples using a Quantulus-1220 liquidscintillation spectrometer; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozyorsk, 2016; certificate of certification No. 222.0032 / RA.RU.311866 / 2019 (In Russ.)]

<sup>4</sup>Гост Р 572016-2016 Национальный Стандарт Российской Федерации. Радиационный контроль. Представление Результатов Измерения. [GOST R 572016-2016. National Standard of the Russian Federation. Radiation control. Presentation of Measurement Results (In Russ.)]

В 2016 году для сбора данных о возможных факторах, предположительно влияющих на уровни ОА трития в моче людей, было проведено анкетирование, включающее в себя следующие вопросы: пол, возраст, место работы (учебы), адрес постоянного места жительства в Озерске, основной источник потребления воды дома (ИПВД) для питьевых и пищевых нужд. С 2017 года в анкету были добавлены вопросы об основном источнике потребления воды на работе (ИПВР), массе и длине тела. В качестве основного источника потребления воды для питьевых и пищевых нужд анкетировемым жителям предлагалось указать один из следующих вариантов: 1) «вода бутилированная» (произведенная за пределами города Озерска), 2) «вода водопроводная». Для расчета расстояния от ПО «Маяк» до места работы (учебы) и постоянного места жительства участников исследования использовался сервис «Яндекс. Карты». Точкой отсчета являлась координата [14].

В 2021 году четыре дня подряд одновременно отбирались пробы конденсата воздуха с использованием бытовых кондиционеров, расположенных в двух зданиях подразделений ЮУриБФ на расстоянии 6,0 км и 9,8 км от точки отсчета ПО «Маяк» с последующим измерением ОА трития по вышеуказанной МИ.

Для оценки индивидуальных годовых ОЭД от трития у жителей, в условиях стабильной радиационной обстановки на ПО «Маяк», использовались коэффициенты перехода от ОА трития в моче к ОЭД из собственной методики выполнения расчетов [14].

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения Microsoft Excel и программы статистического анализа R версии 4.3.3 "Angel Food Cake" (использован дополнительный пакет «dunn.test»). Для построения модели зависимости ОА трития в моче населения от исследуемых факторов использовались регрессионные методы анализа. При этом для учета неопределенности результатов измерения использовали их статистический вес, обратно пропорциональный квадрату стандартного отклонения, равного абсолютной погрешности при  $P=0,68$ . Для сравнения нескольких выборок по медиане использовался критерий Краскела-Уоллиса и дополнительный тест Данна. Для проверки нормальности распределения доз использовался критерий Шапиро-Уилка.

## Результаты и обсуждение

Результаты измерения ОА трития в моче 218 жителей находились в диапазоне от 4 Бк/л до 49 Бк/л со средним значением 21,9 Бк/л и среднеквадратичным отклонением 7,2 Бк/л. Три результата измерения ОА трития в моче оказались ниже предела обнаружения 8 Бк/л. Медианное значение ОА трития в моче населения г. Озерска, равное 22,5 Бк/л, было ниже диапазона значений ОА трития от 25 до 37 Бк/л в воде озера Иртыш, измеренного в период с 2014 по 2023 год, являющимся основным источником водоснабжения населения г. Озерск [14; 15]. Это свидетельствовало о разбавлении поступившего трития в организм за счет привозной пищи и бутилированной воды, произведенных на территориях, удаленных от техногенных источников трития.

В исследовании Е.Л. Мурашовой и В.А. Чудина показано, что в период с 2001 по 2002 годы средний уровень ОА трития в моче 19-ти жителей г. Озерска составлял  $126,2 \pm 10,4$  Бк/л [8], что косвенно свидетельствует о снижении уровней выбросов и сбросов трития ПО «Маяк» в сравнении с более ранними работами [6, 7]. В исследовании 2015 года ОА трития в моче 50-ти жителей г. Заречный, расположенного рядом с Белоярской АЭС, была в диапазоне 12–65 Бк/л при среднем значении 39 Бк/л [16]. В канадском исследовании 2001 года ОА трития в моче трех жителей, проживающих на удалении 8, 10 и 200 км от тяжеловодного реактора, была равна 32,2, 15,9 и 6,5 Бк/л соответственно [17]. Таким образом, в этих двух работах уровни ОА трития в моче были сопоставимы с уровнями ОА трития данного исследования. В китайском исследовании 2015 года ОА трития в моче у 34-х взрослых жителей, проживавших на расстоянии 2, 10 и 22 км от атомной электростанции, находилась в диапазонах 1,26–6,73 Бк/л, 1,31–3,09 Бк/л и 2,21–3,81 Бк/л соответственно [18]. Во всех перечисленных работах не было разработано регрессионных моделей зависимости ОА трития в моче от возраста и расстояния до предприятия, проводящего сбросы и выбросы трития в окружающую среду.

Статистические характеристики анализируемой группы населения города Озерска представлены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические характеристики анализируемой группы населения города Озерска  
[Table 1. Statistical characteristics of the analyzed group of Ozyorsk population]

Параметр [Parameter]	Среднее [Average]	Медиана [Median]	Миним. [Min]	Максим. [Max]	СКО [SD]	СОШ [SE]
Возраст, лет [Age, years] (n=218)	37,6	40	2	83	21,4	1,4
Расстояние от ПО «Маяк» до дома, км [Distance between the Mayak PA and the home, km] (n=218)	8,6	8,6	7,5	9,6	0,5	0,03
Расстояние от ПО «Маяк» до работы, км [Distance between the Mayak PA and the job place, km] (n=218)	7,6	8,1	1,9	13,8	1,6	0,1
Длина тела, см [Body length, cm] (n=188)	160,2	164	92	198	20,4	1,5
Масса тела, кг [Body weight, kg] (n=188)	67	69	12	142	26,9	2,0
ОА трития в моче, Бк/л [Tritium VA in urine, Bq/l] (n=218)	21,9	21,5	4	49	7,2	0,5

Примечание: n – количество наблюдений; СКО – Среднеквадратическое отклонение; СОШ – Стандартная ошибка. [Note: n – number of observations; SD – Standard Deviation; SE – Standard error.]

В анализе исследовалось влияние на ОА трития в моче населения следующих факторов: пол, возраст, расстояния от ПО «Маяк» до дома и работы (учебы), ИПВД, ИПВР, длина и масса тела.

Статистические характеристики распределений ОА трития в моче у населения Озерска в зависимости от года отбора пробы показаны на рисунке 1 в виде «ящика с усами». Из рисунка 1 следует, что медианные годовые значения ОА трития в моче не превышали 40 Бк/л.



Рис. 1. Статистические характеристики распределений ОА трития в моче жителей г. Озерска в зависимости от года исследования. Линия внутри ящика – медиана; нижняя и верхняя грань ящика – размах между 25 % и 75 % квантилями.

Горизонтальные черточки на конце «усов» – максимальное и минимальное значение (без учета выбросов)

[Fig. 1. Statistical characteristics of tritium VA distribution in the urine of Ozyorsk residents by years of investigation. (Note. Lines inside the box – median level; upper and lower borders of the box – the range between 25 % and 75 % quartiles. Horizontal dashes at the end of the whiskers – maximal and minimal values (not taking into account the releases))]

По критерию Краскела–Уоллиса было выявлено статистически значимое различие между ОА трития в моче жителей, отнесенных к разным годам отбора проб (Kruskal-Wallis Chi-squared = 64, 177; df = 4; p-value = 3,835 e-13). По дополнительному тесту Данна не было выявлено статистически значимых медианных различий ОА трития в моче между 2016 и 2023 годами (KW=0,86; p=0,19), а также 2018 и 2021 годами (KW=0,28; p=0,39). Таким образом, в последующий анализ

был введен фактор «Годы», учитывающий наличие или отсутствие статистически значимых различий ОА трития по медиане, разделяющий выборку на три группы (Группа Г1: 2016 и 2023 гг.; Группа Г2: 2018 и 2021 гг.; Группа Г3: 2017 г.).

Статистические характеристики распределений ОА трития в моче в зависимости от источника питьевого водоснабжения используемого дома представлены на рисунке 2.



Рис. 2 Статистические характеристики распределений ОА трития в моче жителей г. Озерска в зависимости от источника питьевого водоснабжения используемого дома

[Fig. 2. Statistical characteristics of tritium VA distribution in the urine of Ozyorsk residents in relation to the source of drinking water at home]

По критерию Краскела-Уоллиса было выявлено статистически значимое различие между медианами ОА трития в моче у групп жителей, использовавших бутилированную и водопроводную воду дома ( $KW=43,3$ ;  $p < 10^{-5}$ ).

Корреляционный анализ выявил два фактора, являющихся линейными переменными, статистически значимо влияющих на ОА трития в моче: слабая прямая корреляция по шкале

Чеддока с возрастом человека в годах ( $r=0,13$ ;  $p=0,042$ ), слабая обратная корреляция с расстоянием от постоянного места проживания до ПО «Маяк» ( $r=-0,14$ ;  $p=0,034$ ). На рисунке 3 представлен график зависимости ОА трития в моче жителей от расстояния до места проживания от ПО «Маяк».

На рисунке 4, представлен график зависимости ОА трития в моче жителей от возраста на момент исследования.

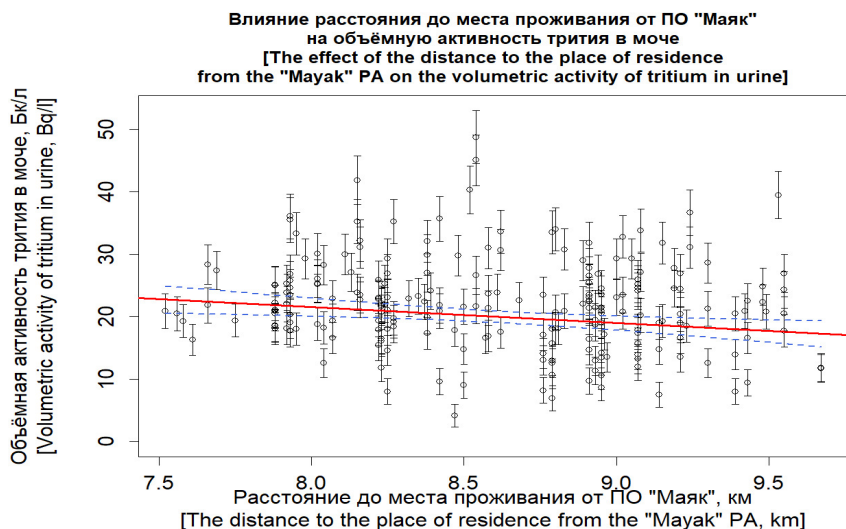


Рис. 3. График зависимости ОА трития в моче жителей от расстояния до места проживания от ПО «Маяк», км. Красная линия – линия регрессии модели. Синие пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % доверительного интервала модели. Черные кружки – отдельные наблюдения. Черные усы - соответствуют абсолютным погрешностям результатов измерения ОА трития в моче при  $P=0,68$

[Fig. 3. Graph of the dependence of tritium VA in the urine of residents on the distance to the place of living to the Mayak PA, km. (Note: The red line – the model's regression line. Blue dotted lines – upper and lower borders of the 95 % confidence intervals of the model. Black circles – certain observations. Black whiskers correspond to absolute uncertainty of the results of measuring tritium VA in urine at  $P=0.68$ )]

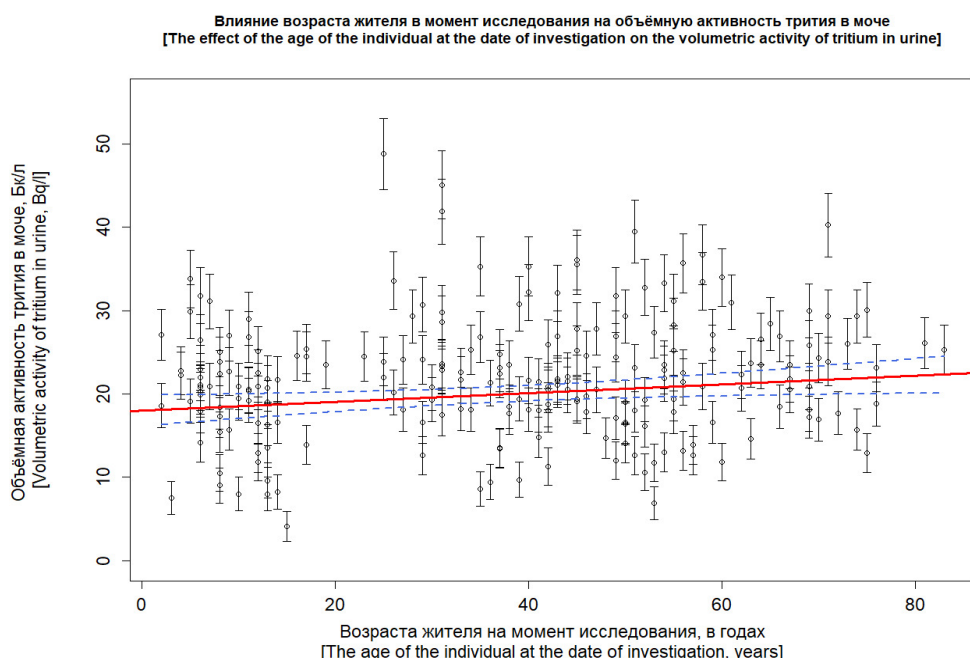


Рис. 4. График зависимости ОА трития в моче жителей от возраста на момент исследования, в годах. Красная линия – линия регрессии модели. Синие пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % доверительного интервала модели. Черные кружки – отдельные наблюдения. Черные усы - соответствуют абсолютным погрешностям результатов измерения ОА трития в моче при  $P=0,68$

[Fig. 4. Graph of the dependence of tritium VA in the urine of residents from the age of the individual at the date of investigation, years. (Note: The red line – the model's regression line. Blue dotted lines – upper and lower borders of the 95 % confidence intervals of the model. Black circles – certain observations. Black whiskers correspond to absolute uncertainty of the results of measuring tritium VA in urine at  $P=0.68$ )]

Остальные факторы: пол, расстояния от ПО «Маяк» до места работы(учебы), источник питьевого водоснабжения на работе (учебе), длина и масса тела не оказывали статистически значимого влияния на ОА трития в моче жителей г. Озерска.

Как видно из информации, представленной на рисунке 3 и рисунке 4, возраст на момент исследования и расстояние

от ПО «Маяк» до постоянного места проживания оказывали разнонаправленное влияние на ОА трития в моче жителей г. Озерска, поэтому для оценки взаимного влияния значимых факторов на ОА трития в моче жителей был проведен многофакторный регрессионный анализ и создана модель №1:

$$OA = a_0 + \begin{cases} a_1, \text{ если } 2018, 2021 \text{ гг.} \\ a_2, \text{ если } 2017 \text{ г.} \end{cases} + \{b, \text{ если ИПВД} = 2\} + c \cdot B + d \cdot \text{РД}, \text{ Бк/л}$$

где  $a_0$  – уровень отсечки ОА трития в моче жителя из подгруппы «Годы» = 2016 и 2023 и ИПВД=, Бк/л;

$a_1$  – дополнительный уровень ОА трития в моче жителя из группы «Годы» = 2018 и 2021, Бк/л;

$a_2$  – дополнительный уровень ОА трития в моче жителя из группы «Годы» = 2017, Бк/л;

$b$  – дополнительный уровень ОА трития в моче при ИПВД=2, Бк/л;

$c$  – коэффициент наклона ОА трития в моче населения

г. Озерска в зависимости от возраста, (Бк/л)/год;

$B$  – возраст на момент обследования, год;

$d$  – коэффициент наклона ОА трития в моче населения г. Озерска в зависимости от расстояния до места проживания от ПО «Маяк», (Бк/л)/км;

$\text{РД}$  – расстояние от ПО «Маяк» до места проживания, км.

Численные значения параметров модели №1 и их ошибки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Численные параметры модели №1

[Table 2. Numerical parameters of Model №1]

Параметр [Parameter]	Размерность [Unit of measurement]	Значение [Value]	Стандартная ошибка [Standard error]	p
$a_0$	Бк/л [Bq/l]	27,3	6,0	<0,001
$a_1$	Бк/л [Bq/l]	5,27	0,71	2,64e-12
$a_2$	Бк/л [Bq/l]	14,6	2,1	4,32e-11
$b$	Бк/л [Bq/l]	6,15	0,83	<0,001
$c$	(Бк/л)/год [(Bq/l)/year]	0,041	0,016	0,01267
$d$	(Бк/л)/км (Bq/l)/km]	-1,9	0,7	0,046

Примечание: 218 наблюдений, остаточное стандартное отклонение: 1,86 (df = 212),  $R^2=0,49$ ; скорректированный  $R^2 =0,47$ ; p-value: < 2,2e-16 [Note: 218 observations, residual standard error: 1.86 (df = 212),  $R^2=0.49$ ; adjusted  $R^2 =0.47$ ; p-value: < 2.2e-16].

Полученная модель объясняет 47 % дисперсии ОА трития в моче жителей, проживающих в г. Озерске, ошибка модели  $\pm 5,4$  Бк, относительная стандартная ошибка модели  $\pm 30\%$ , Модель описывает взаимное влияние факторов на ОА трития в организме жителей г. Озерска при комбинированном пути поступления трития: через воздух (ингаляционный и перкутанный пути поступления) и пероральный путь. Зафиксировано влияние расстояния от ПО «Маяк» до постоянного места проживания человека на ОА трития в моче, отражающая ингаляционное и перкутанное поступление трития с воздухом, с увеличением расстояния от ПО «Маяк» ОА трития в моче снижалась на  $(1,9 \pm 0,7)$  Бк/л за каждый последующий километр. Таким образом максимальная разница ОА трития в моче жителей на границах жилой зоны г. Озерска, обусловленная ингаляционным и перкутанным поступлением, в среднем составляла  $(9,7-7,5) \cdot 1,9=4,2$  Бк/л.

Также в 2021 году были проведены единичные измерения ОА трития в конденсате воздуха на расстояниях: 6,0 км (медиана: 900 Бк/л) и 9,8 км (медиана: 300 Бк/л) от ПО «Маяк». Было выявлено статистически значимое, более чем в 3 раза отличие по медиане, критерий Краскела –Уоллиса ( $KW=5,33$ ,  $p=0,021$ ) между указанными уровнями ОА

трития в конденсате воздуха. Очевидно, что фактор расстояния оказывает влияние на ОА трития во вдыхаемом воздухе населения г. Озерск. Оценка вклада ингаляционного и перкутанного поступления в суммарное поступление трития в организм жителей требует более масштабного исследования.

В предыдущей работе, основанной на данных, полученных у 30 жителей г. Озерска в 2016 году, была выявлена умеренная положительная корреляция между возрастом и ОА трития в моче ( $r=0,34$ ,  $p=0,038$ ) с коэффициентом наклона  $(0,114 \pm 0,052)$ (Бк/л)/год. При этом предположение о влиянии возраста на ОА было отклонено в виду того, что в основном для питья дети использовали бутилированную воду, а взрослые – воду из централизованной системы водоснабжения [14].

В настоящем исследовании, в первую очередь за счет увеличения объема выборки, удалось выявить слабое влияние возраста на ОА трития в моче жителя с параметром  $(0,041 \pm 0,016)$  (Бк/л)/год. Таким образом максимальная разница ОА трития в моче жителей для всех возрастов из выборки в среднем составляла  $(83-2) \cdot 0,041=3,3$  Бк/л.

В качестве оценки радиационно-гигиенической обстановки г. Озерска от сбросов и выбросов трития

ПО «Маяк» в окружающую среду на основании индивидуальных измерений ОА трития в моче были рассчитаны индивидуальные годовые ОЭД. При расчетах использовались коэффициенты перехода от ОА к ОЭД со значениями 0,015 мкЗв/(Бк/л) для группы старше 12 лет и 0,016 мкЗв/(Бк/л) для группы старше 12 лет и взрослых. Статистические характеристики годовых ОЭД в зависимости от года сбора проб мочи совпадали со статисти-

ческими характеристиками ОА трития в моче с точностью до коэффициента перехода.

Гистограмма частотного распределения и функция плотности распределения исследуемой выборки по значению годовой ОЭД представлены на рисунке 5. Анализ выявил статистически значимое отличие данного распределения как от нормального ( $W = 0,98$ ;  $p = 0,004971$ ), так и от логнормального ( $W = 0,957$ ;  $p = 4,47e-06$ ).

**Гистограмма оценки плотности вероятности распределения ожидаемой эффективной годовой дозы от трития у населения г.Озерска в 2016-18, 2021 и 2023 гг.**  
**[Histogram of the assessment of probability density of the distribution of tritium-caused committed effective dose equivalent annual in Ozyorsk population in 2016-2018, 2021, and 2023.]**

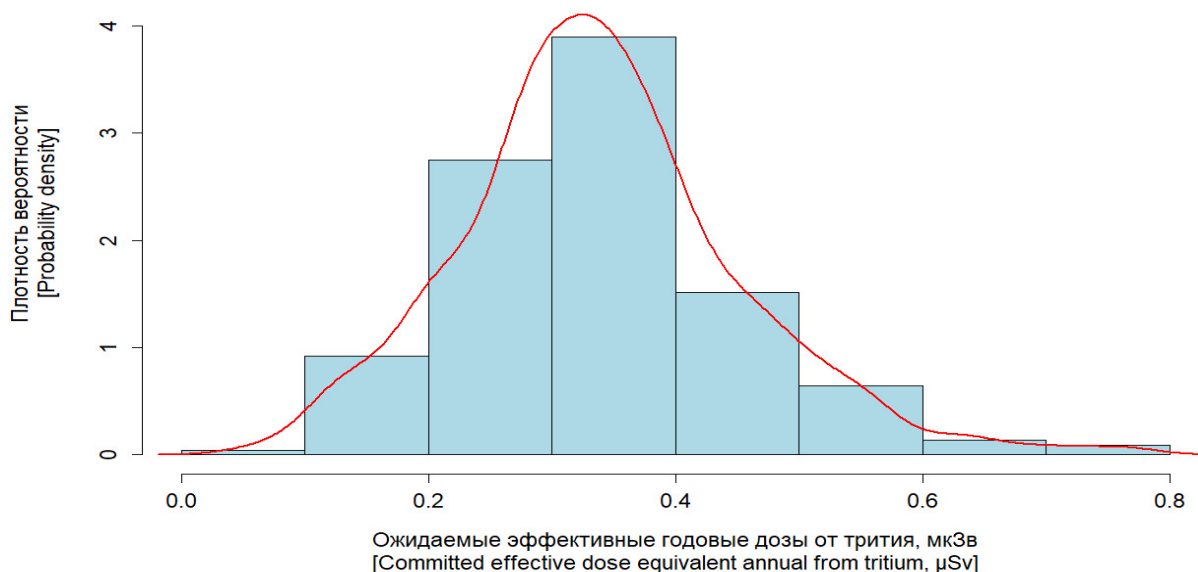


Рис. 5. Гистограмма оценки плотности вероятности с кривой плотности вероятности (красная линия) распределения ОЭД от трития у населения г. Озерска в 2016-18, 2021 и 2023 гг.

[Fig. 5. Histogram of the assessment of probability density with density curve of the probability (red line) of the distribution of tritium-caused CEDE in Ozyorsk population in 2016-2018, 2021, and 2023]

Основные статистические характеристики оценок годовых ОЭД от трития у населения г. Озерска, обусловленные поступлением в 2016-2018, 2021 и 2023 г. в условиях стабильной радиационной обстановки, полученные на выборке из 218 человек, были следующие: минимальное значение 0,07 мкЗв, среднее значение 0,33 мкЗв, коэффициент вариации 33 %, максимальное значение 0,76 мкЗв. Таким образом, за период наблюдения среднее значение ОЭД составляло 0,033 %, а максимальное значение – 0,076 % от предела годовой эффективной дозы для населения, равного 1 мЗв согласно «Норм Радиационной Безопасности»<sup>5</sup>.

### Заключение

Исходя из полученных результатов анализа можно сделать следующие выводы:

1. Уровни ОА трития в моче жителей г, Озерска находились в диапазоне от 4 до 49 Бк/л.
2. Основными факторами, влияющими на уровень ОА трития в моче, являлись: год отбора проб мочи, основной

источник потребления воды дома для питьевых и пищевых нужд, расстояние от ПО «Маяк» до постоянного места жительства и возраст. Первые два фактора являлись групповыми (категорийными) переменными, последние два – линейно-непрерывными. Остальные факторы: пол, расстояние от ПО «Маяк» до места работы (учебы), источник питьевого водоснабжения на работе (учебе), длина и масса тела не оказывали статистически значимого влияние на ОА трития в моче жителей г. Озерска.

3. Создана многофакторная регрессионная модель оценки ОА трития в моче жителей г. Озерска при комбинированном пути поступления трития: через воздух (ингаляционный и перкутанный пути поступления) и пероральный путь.

4. Полученная модель объясняла 47 % дисперсии ОА трития в моче жителей со стандартной ошибкой  $\pm 5,4$  Бк/л, относительная стандартная ошибка модели составляла  $\pm 30$  %.

<sup>5</sup>НРБ 99/2009 (СанПиН 2.6.1.2523-09) [Radiation Safety Standards (NRB-99/2009), Sanitary-Epidemiological Rules and Norms, Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology Publ.,2009, 100 p. (In Russ.)]

5. Результаты единичных измерений объемной активности трития в конденсате воздуха на расстояниях 6,0 и 9,8 км от ПО «Маяк» указывают на статистически значимое, более чем в  $\sim 900/300=3$  раза, отличие между ними. Данные измерений конденсата воздуха подтверждают значимое влияние на ОА трития в моче жителей г. Озерска расстояния от ПО «Маяк» до постоянного места жительства.

6. Оценки ОЭД жителей г. Озерска составляли менее 0,076 % от дозового предела 1 мЗв, т.е. были меньше его в 1300 и более раз. Таким образом, в рассматриваемом периоде с 2016 по 2023 годы выбросы и сбросы трития ПО «Маяк» не представляли радиологической опасности для населения г. Озерска.

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

Финашов Л.В. – существенный вклад в разработку концепции исследования; сбор, анализ и интерпретация данных; написание текста статьи и ее редактирование для важного интеллектуального содержания; утверждение окончательного варианта статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Востротин В.В. – существенный вклад в разработку концепции исследования; сбор, анализ и интерпретация данных; написание текста статьи и ее редактирование для важного интеллектуального содержания; утверждение окончательного варианта статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

#### Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за ценные замечания, которые способствовали улучшению качества публикации.

#### Информация о конфликте интересов

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

#### Сведения об источнике финансирования

Финансирование осуществлялось ФМБА России в рамках выполнения Государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 388-00097-25-00 от 25.12.2024.

#### Литература

1. Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С. и др. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. Под ред. В.С. Калистратовой. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2012. 464 с. URL: <http://ecoradmod.narod.ru/rus/publication2/RNMonografiya.pdf> (Дата обращения: 31.07.2025).
2. Востротин В.В., Финашов Л.В. Оценка поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г. // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 78-90. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-78-90.
3. Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера

Кызылташ // Радиационная гигиена. 2023. Т. 15, № 4. С. 88-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96.

4. Мокров Ю.Г. Вклад радиохимического завода РТ-1 в формирование тритиевого загрязнения в районе деятельности ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы Радиационной Безопасности. 2024. Т. 114, № 2. С. 29-43.
5. Mohamed Abdou, Marco Riva, Alice Ying, et al. Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self-sufficiency // Nuclear Fusion. 2021. Vol. 61, № 1. P. 013001.
6. Телушкина Е.Л., Демин С.Н. Радиационно-гигиеническая оценка загрязнения внешней среды тритием и дозовые нагрузки на население в районе радиохимического предприятия // Бюллетень радиационной медицины. 1987. № 1. С. 23-28.
7. Телушкина Е.Л., Демин С.Н. Динамика уровней содержания трития в атмосферном воздухе и организме жителей зоны наблюдения вокруг радиохимического комбината // Бюллетень радиационной медицины. 1988. № 1. С. 141-144.
8. Мурашова Е.Л., Чудин В.А. Оценка содержания трития в организме взрослого населения города Озерска // Вопросы радиационной безопасности. 2002. № 4. С. 57-60.
9. Уйба В.В., Аклеев А.В., Азизова Т.В. Итоги 63-й сессии Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН (Вена, 27 июня - 1 июля 2016 г.) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т. 61, № 5. С. 69-79.
10. Янов А.Ю., Востротин В.В., Финашов Л.В. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты // Человек. Спорт. Медицина. 2016. Т. 16, № 2. С. 85-99. DOI: 10.14529/hsm160209.
11. Москалев Ю.И. Окись трития / Под ред. проф. Ю.И. Москалева. Атомиздат. М.: 1968. 396 с.
12. Butler H.L., Leroy J.H. Observation of Biological Half-Life of Tritium // Health Physics. 1965. Vol. 11, № 4. P. 283-285.
13. Osborne R.V. Absorption of Tritiated Water Vapor by People // Health Physics. 1966. Vol. 12, № 11. P. 1527-1538.
14. Финашов Л.В., Востротин В.В., Янов А.Ю. Тритий в моче у жителей города Озерска Челябинской области в 2016 г. // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 42-49. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-42-49.
15. Vostrotnin V.V., Yanov A.Yu., Finashov L.V. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production Association in 2014-15 // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, № 2. DOI: 10.1088/1361-6498/abe8c8.
16. Чеботина М.Я., Николин О.А., Бондарева Л.Г. и др. Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 87-92. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92.
17. Kotzer T., Trivedi A. Dosimetric Implications of Atmospheric Dispersal of Tritium near a Heavy-water Research Reactor Facility // Radiation Protection Dosimetry. 2001. Vol. 93, № 1. P. 61-66.
18. Shen B.-M., Ji Ya.-Q., Tian Q. et al. Determination of Total Tritium in Urine from Residents Living in the Vicinity of Nuclear Power Plants in Qinshan, China // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2015. Vol. 12, № 1. P. 888-894. DOI: 10.3390/ijerph120100888.

Поступила: 12.09.2025

**Финашов Леонид Викторович** – заведующий лабораторией, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, г. Озерск, Озерское шоссе, д.19; E-mail: finashov@subi.su, finashov@sucmb.su

ORCID: 0000-0003-2261-6589

**Востротин Вадим Владимирович** – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID: 0000-0002-3999-5223

**Для цитирования:** Финашов Л.В., Востротин В.В. Факторы, влияющие на объёмную активность трития в моче жителей Озерска // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 113–122. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-113-122

---

## Factors affecting the volume activity of tritium in the urine of Ozyorsk residents

Leonid V. Finashov, Vadim V. Vostrotin

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

*The Mayak Production Association is an enterprise of the Rosatom State Corporation, characterized by the highest tritium emissions, which exceed the total emissions from all other nuclear industry and nuclear power enterprises in the Russian Federation. Consequently, the population of Ozyorsk, residing in close proximity to the Mayak Production Association, has been and continues to be exposed to internal irradiation from tritium over a prolonged period. The aim of this study is to investigate the factors affecting the volumetric activity of tritium in urine samples from residents of Ozyorsk, a city located in the area influenced by the Mayak Production Association, to estimate the committed effective dose equivalent of internal exposure from tritium. Materials and Methods: Urine samples were collected from Ozyorsk residents in 2016, 2017, 2018, 2021, and 2023. A total of 218 samples were collected, including 58 samples from children. The volumetric activity of tritium in urine was measured using a Quantulus-1220 device. To collect data on factors influencing tritium levels in residents' urine, a questionnaire survey was conducted. Statistical analysis was performed using Microsoft Excel and R software. Results and Discussion: The volumetric activity levels of tritium in the urine of Ozyorsk residents ranged from 4 to 49 Bq/L. A multivariate regression model was developed to describe the influence of various factors on the volumetric activity of tritium in residents' urine under combined pathways of tritium intake. Estimates of the expected effective doses for Ozyorsk residents were less than 0.076 % of the dose limit of 1 mSv. Conclusion: Investigating the key factors affecting the volumetric activity of tritium in residents' urine allows not only to assess actual internal exposure doses but also to predict the doses in the event of increased tritium emissions from enterprises of the Rosatom State Corporation. Additionally, it facilitates the development of approaches for retrospective dose assessment in the population.*

**Key words:** tritium, route of entry, volume activity, internal exposure, population, committed effective dose equivalent, radiation safety, Mayak production association, multifactorial regression model.

### Authors' personal contribution

Finashov L.V. – significant contribution to the development of the study design; collection, analysis and interpretation of the data; writing the text of the manuscript and its editing for important intellectual content; approval of the final version of the manuscript for publication; agreement to be in charge of all the aspects of the manuscript, providing due research and solving the issues related to accuracy and integrity of any part of the work.

Vostrotin V.V. – significant contribution to the development of the study design; collection, analysis and interpretation of the data; writing the text of the manuscript and its editing for important

intellectual content; approval of the final version of the manuscript for publication; agreement to be in charge of all the aspects of the manuscript, providing due research and solving the issues related to accuracy and integrity of any part of the work.

### Acknowledgements

The authors express deep gratitude to the reviewers for their valuable comments that contributed to better quality of the publication.

---

**Leonid V. Finashov**

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

**Address for correspondence:** 19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: finashov@subi.su, finashov@sucmb.su

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests in the course of the research work and preparation of the manuscript.

### Sources of funding

The funding was granted by FMBA of Russia in the framework of the Government assignment for state services (work contract) № 388-00097-25-00 as of 25.12.2024.

### References

- Kalistratova VS, Belyaev IK, Zhorova ES, Nisimov PG, Parfenova I.M., Tishchenko G.S. et al. Radiobiology of incorporated radionuclides. Ed. by Kalistratova VS. Publ. Burnasyan FMBC of the FMBA of Russia; 2012. 464 p. (In Russian). URL: <http://ecoradmod.narod.ru/rus/publication2/RNMonografiya.pdf> [Accessed: 01.08.2025].
- Vostrotin VV, Finashov LV. Estimate of Tritium Intake in the Air from Coastal Plants of Lake Kyzyltash in 2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 78-90. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-78-90.
- Vostrotin VV, Yanov AYu. Assessment of the level of annual intake of tritium into the air from the surface of the lake Kyzyltash. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 88-96. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96.
- Mokrov YG. Contribution of the radiochemical plant RT-1 to development of tritium contamination in the area of the Mayak PA activity. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2024;114(2): 29-43 (In Russian).
- Abdou M, Riva M, Ying A, Day Ch, Loarte A, Baylor L, et al. Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency. *Nuclear Fusion*. 2021;61(1): 013001. DOI:10.1088/1741-4326/abbf35.
- Telushkina EL, Demin SN. Radiation and hygienic estimates of tritium environmental contamination and dose loads for the population in the area of a radiochemical production facility. *Byulleten radiatsionnoy meditsiny = Radiation medicine report*. 1987;1: 23-28 (In Russian).
- Telushkina EL, Demin SN. Dynamics of tritium levels in the air and in the bodies of the residents of the observed area close to a radiochemical production facility. *Byulleten radiatsionnoy meditsiny = Radiation medicine report*. 1988;1: 141-144 (In Russian).
- Murashova EL, Chudin VA. Assessment of tritium content in the body of the adult population of the city of Ozyorsk. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2002;4: 57–60 (In Russian).
- Uiba VV, Akleyev AV, Azizova TV, Geraskin SA, Ivanov VK, Koterov AN, et al. Results of the 63rd session of United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation (UNSCEAR) (Vienna, June 27 – July 1, 2016). *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2016;61(5): 69–79 (In Russian).
- Yanov AYu, Vostrotin VV, Finashov LV. Environmental Tritium in the Ural Region: Current Situation and Radiation Protection Analysis of Research Perspectives. *Chelovek. Sport. Meditsina = Human. Sport. Medicine*. 2016;16(2): 85-99 (In Russian). DOI: 10.14529/hsm160209.
- Moskalev Yul. Tritium oxide / Ed. by prof. Yul Moskalev. Moscow: Atomizdat; 1968. 396 p. (In Russian).
- Butler HL, Leroy JH. Observation of Biological Half-Life of Tritium. *Health Physics*. 1965;11(4): 283-285.
- Osborne RV. Absorption of Tritiated Water Vapor by People. *Health Physics*. 1966;12(11): 1527-1538.
- Finashov LV, Vostrotin VV, Yanov AYu. Tritium in urine in residents of Ozyorsk, the Chelyabinsk region in 2016. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 42-49. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-42-49.
- Vostrotin VV, Yanov AYu, Finashov LV. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production Association in 2014-15. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(2). DOI: 10.1088/1361-6498/abe8c8.
- Chebolina MYa, Nikolin OA, Bondareva LG, Rakitsky VN. Tritium in Urine of People Living in The Area of Influence of the Beloyarskaya NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 87-92. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92.
- Kotzer T, Trivedi A. Dosimetric Implications of Atmospheric Dispersal of Tritium near a Heavy-water Research Reactor Facility. *Radiation Protection Dosimetry*. 2001;93(1): 61-66. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006414.
- Shen B-M, Ji Ya-Q, Tian Q, Shao X-Zh, Yin L-L, Su X. Determination of Total Tritium in Urine from Residents Living in the Vicinity of Nuclear Power Plants in Qinshan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015;12(1): 888-94. DOI: 10.3390/ijerph120100888.

Received: September 12, 2025

**For correspondence: Leonid V. Finashov** – Head of the Laboratory, Researcher at the Laboratory of Radiation Hygiene, Southern Urals Federal Research and Clinical Center of Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency (19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk region, 456783.; E-mail: [finashov@subi.su](mailto:finashov@subi.su), [finashov@sucmb.su](mailto:finashov@sucmb.su))  
ORCID: 0000-0003-2261-6589

**Vadim V. Vostrotin** – Candidate of Biological Sciences, Head of the laboratory, Senior Researcher at the Laboratory of Mathematical Modeling and Software and Information Support, Southern Urals Federal Research and Clinical Center of Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency. Ozyorsk, Russia  
ORCID: 0000-0002-3999-5223

**For citation: Finashov L.V., Vostrotin V.V. Factors affecting the volume activity of tritium in the urine of Ozyorsk residents. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 113–122. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-113-122**

## Гигиеническая оценка уровней, структуры доз облучения и радиационных рисков населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Библин А.М.

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

*Ежегодная оценка уровней и структуры доз облучения населения необходима для выделения приоритетных ситуаций облучения и обоснования мер управления радиационными рисками на уровне субъекта Российской Федерации. Цель исследования – дать гигиеническую оценку доз облучения населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области в 2014–2023 гг., проанализировать структуру доз и сопоставить радиационные риски для здоровья населения за счет различных источников облучения. Материалы и методы: Проанализированы радиационно-гигиенические паспорта Санкт-Петербурга и Ленинградской области за 2014–2023 гг., данные Федерального банка радиационно-гигиенических паспортов, сборников «Дозы облучения населения Российской Федерации» и справочников «Радиационная обстановка на территории Российской Федерации». Показатели среднего индивидуального пожизненного радиационного риска рассчитаны по МР 2.6.1.0145-19. Результаты исследования и обсуждение. Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения от всех источников за исследуемый период находилась в диапазоне 3,8–5,2 мЗв в Санкт-Петербурге и 3,2–4,2 мЗв в Ленинградской области; в 2023 г. вклад природных источников достигал 72 % и 89 % соответственно, медицинских – 27 % и 11 %, прочих – менее 1 %. В 2014–2023 гг. отмечен рост доз медицинского облучения (темпы роста 246,6 % в Санкт-Петербурге и 232,0 % в Ленинградской области), при этом основной вклад в коллективную дозу обеспечивала компьютерная томография. Наибольший вклад в средний индивидуальный пожизненный радиационный риск для здоровья населения регионов вносило воздействие радона; риск за счет медицинского облучения в Санкт-Петербурге был выше, чем в Ленинградской области (максимум  $8,7 \times 10^{-5}$  в 2023 г. против  $3,4 \times 10^{-5}$  в Ленинградской области). Техногенное облучение населения на загрязнённых территориях и в зонах наблюдения радиационных объектов оставалось низким (0,1 мЗв и  $\leq 0,006$  мЗв соответственно). Заключение: Полученные результаты уточняют региональные приоритеты направлений работ по минимизации радиационного риска – разработка и реализация региональных радоновых программ, а также оптимизация и обоснование рентгенодиагностических исследований.*

**Ключевые слова:** дозы облучения, население, персонал, радиационный риск, Санкт-Петербург, Ленинградская область.

### Введение

Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД) и система радиационно-гигиенической паспортизации организаций и территорий (РГП) служат важными источниками сведений о радиационной обстановке и дозах облучения населения. Эти системы представляют собой совокупность организационных, методических и программно-технических элементов, обеспечивающих получение, накопление, хранение и аналитическую обработку данных, характеризующих состояние радиационной безопасности населения в Российской Федерации и её отдельных субъектах [1].

Гигиеническая оценка дозовых нагрузок населения и персонала в динамике позволяет не только описывать текущую радиационную обстановку, но и выделять ситуации облучения, определяющие приоритеты профилактики и управления рисками для здоровья.

Уровень и структура доз облучения населения во многом связаны с природными и техногенными особенностями конкретной территории. В этой связи сравнительная оценка доз облучения отдельных территорий представляет научный и практический интерес [2].

**Цель исследования** — дать гигиеническую оценку доз облучения населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области в 2014–2023 гг., проанализировать структуру доз и радиационные риски для здоровья населения за счет различных источников облучения.

### Материалы и методы

При выполнении данного исследования была проанализирована информация о Санкт-Петербурге (СПб) и Ленинградской области (ЛО) за 2014–2023 гг., содержащаяся в Федеральном банке данных радиационно-гигиенических паспортов субъектов Российской Федерации, а также сборники «Дозы облучения населения Российской Федерации» и

**Библин Артём Михайлович**

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

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

справочники «Радиационная обстановка на территории Российской Федерации [3–13]. Анализ радиационного риска проводился в соответствии с МР 2.6.1.0145-19<sup>1</sup> с использованием специализированного программного обеспечения [14].

СПб и ЛО – субъекты Российской Федерации, расположенные на территории Северо-Западного федерального округа. Площадь ЛО составляет 8390,8 тыс. га. На юго-западе ЛО граничит с Эстонией, на северо-западе с Финляндией. Площадь СПб составляет 140,4 тыс. га. СПб граничит с ЛО, а также имеет морские границы с Финляндией и Эстонией. Численность населения СПб составляет 5,60 млн человек, ЛО – 2,03 млн человек.

На территории СПб объекты 1-й и 2-й категории потенциальной радиационной опасности отсутствуют. На территории ЛО функционируют два объекта первой категории опасности (среди них Ленинградская АЭС) и четыре объекта второй.

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в западной части ЛО были загрязнены территории Кингисеппского, Волосовского, Лужского, Ломоносовского и Гатчинского районов. Всего на территории ЛО находится 29 населенных пунктов, отнесенных к зоне проживания

с льготным социально-экономическим статусом. Из них в Кингисеппском районе 22 населённых пункта с общей численностью населения на 01 января 2023 года 5896 человек, в Волосовском районе – 7 с общей численностью населения на 01 января 2023 года 6952 человека.

В ЛО и СПб имеются радоноопасные территории. Согласно радиационно-гигиеническому паспорту территории, в ЛО выявлено 20 радоноопасных участков площадью от 100 до 3275 км<sup>2</sup> с общей площадью 19000 км<sup>2</sup>, что составляет 25,8 % от площади ЛО. Согласно радиационно-гигиеническому паспорту территории, в СПб радоноопасными территориями являются Красносельский и Пушкинский районы. На территории этих районов имеются участки с площадью до 0,5–1,0 га с повышенным радоновыделением.

**Результаты и обсуждение**

Средние индивидуальные годовые эффективные дозы облучения (СИГЭДО) населения СПб за счет всех источников в исследуемые годы варьировались в пределах от 3,8 до 5,2 мЗв, темп роста составил 37,1 % (рис. 1). В ЛО СИГЭДО населения за счет всех источников варьировались в пределах от 3,2 до 4,2 мЗв, темп роста составил 31,87 %.

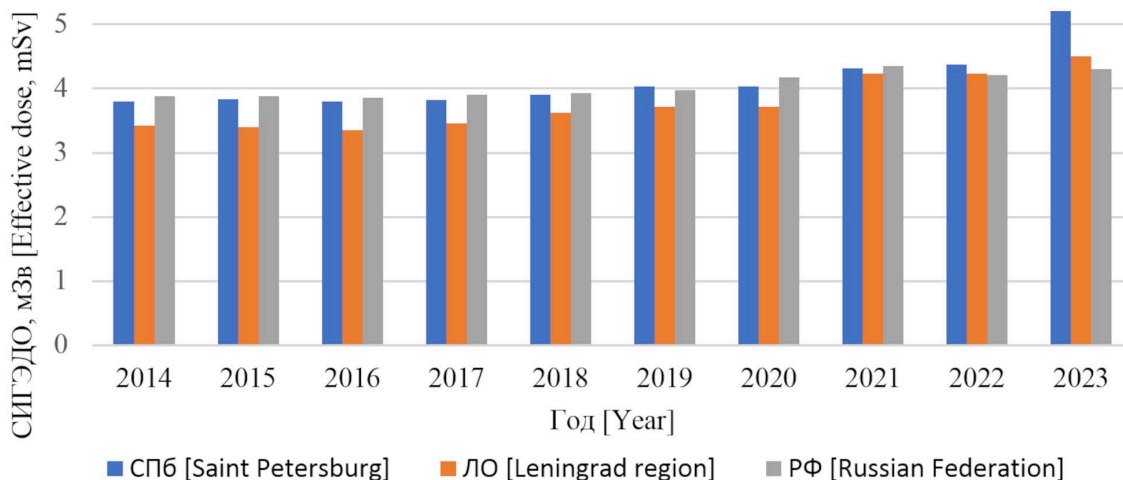


Рис. 1. СИГЭДО населения РФ, СПб и ЛО в 2014–2023 гг., мЗв

[Fig. 1. Effective doses to the population of the Russian Federation, Saint Petersburg and Leningrad Oblast in 2014–2023, mSv]

В 2023 году в СПб вклад природных источников в СИГЭДО населения составил 72 %, медицинских – 27 %. На долю остальных (эксплуатация ИИИ и техногенный фон) приходилось менее 1 % (табл. 1). В ЛО в 2023 году 89 % СИГЭДО населения были обусловлены природными

источниками излучения и 11 % – медицинскими рентгенорадиологическими диагностическими исследованиями. На долю остальных (эксплуатация ИИИ и техногенный фон) приходилось менее 1 %.

Таблица 1. Структура доз облучения населения в РФ, СПб и ЛО в 2023 году, %

[Table 1. Structure of radiation doses to the population of the Russian Federation, Saint Petersburg and Leningrad Oblast in 2023, %]

Вид источника [Source type]	СПб [Saint Petersburg]	ЛО [Leningrad Oblast]	РФ [Russian Federation]
Природные источники [Natural sources]	61,25	81,13	74,13
Медицинские источники [Medical sources]	38,6	18,62	25,67
Эксплуатация ИИИ [Operation of radiation sources]	0,05	0,14	0,05
Техногенный фон [Technogenic background]	0,10	0,11	0,15

<sup>1</sup>Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации: Методические рекомендации МР 2.6.1.0145-19. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 23.04.2019. [Calculation of radiation risk indicators based on the data contained in the radiation and hygienic passports of the territories to provide a comprehensive comparative assessment of the radiation safety status of the population of the subjects of the Russian Federation. Guidelines MR 2.6.1.0145-19. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 23.04.2019. (In Russ.)]

В СПб СИГЭДО персонала группы А за исследуемый период выросла с 1,43 до 1,53 мЗв, темп роста составил 7,0 %

(рис. 2). В ЛО СИГЭДО персонала группы А снизилась с 1,69 до 1,56 мЗв, темп снижения – 7,7 %.

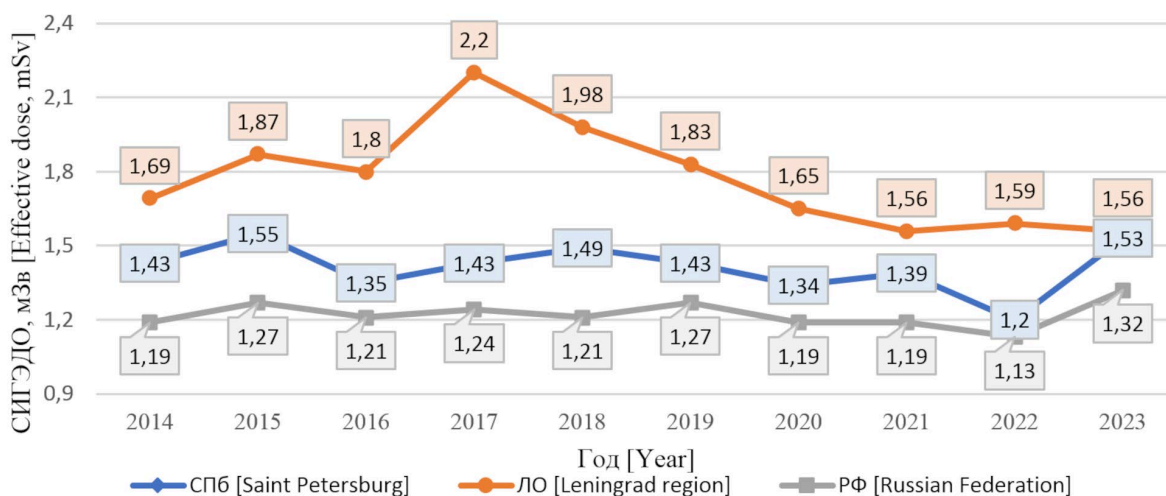


Рис. 2. СИГЭДО персонала группы А в РФ, СПб и ЛО в 2014–2023 гг., мЗв

[Fig. 2. Effective doses to category A personnel in the Russian Federation, Saint Petersburg and Leningrad Oblast in 2014–2023, mSv]

СИГЭДО персонала группы А в СПб и ЛО на протяжении всего оцениваемого периода времени были выше среднероссийских значений. Причиной этого является более высокий уровень внедрения ИИИ в промышленность и здравоохранение регионов. При этом СИГЭДО персонала группы А за весь исследуемый период времени и в СПб, и в ЛО остаются значительно ниже установленного годового предела. В СПб за исследуемый период работники с годовыми дозами облучения, превышающими 20 мЗв, отсутствовали. В ЛО годовая доза работников в диапазоне 20-50 мЗв отмечалась у 5 человек. Случаев превышения годовой дозы 50 мЗв в ЛО зафиксировано не было.

В период с 2014 по 2023 год СИГЭДО населения, проживающего на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению за счет аварии на ЧАЭС в ЛО, составляли 0,1 мЗв. Этократно ниже, чем годовой предел дозы для населения за счет дополнительного техногенного облучения.

За оцениваемый промежуток времени СИГЭДО населения, проживающего в зонах наблюдения радиационных объектов, не превышали 0,006 мЗв.

СИГЭДО населения за счет природных источников в СПб соответствуют среднероссийским, в ЛО – несколько ниже (табл.2).

Таблица 2. Структура средней индивидуальной годовой эффективной дозы облучения населения РФ в целом, СПб и ЛО природными источниками в 2023 г., мЗв/год

[Table 2. Structure of the average individual annual effective dose to the population of the Russian Federation as a whole, Saint Petersburg and Leningrad Oblast from natural sources in 2023, mSv/year]

Субъект РФ [Subject of the Russian Federation]	К-40 [K-40]	Космическое излучение [Cosmic radiation]	Внешнее терригенное облучение [External terrestrial radiation]	Радон [Radon]	Продукты питания [Food products]	Питьевая вода [Drinking water]	Атмосферный воздух [Atmospheric air]	Полная [Total]
СПб [Saint Petersburg]	0,17	0,33	0,79	1,71	0,12	0,07	0,01	3,19
ЛО [Leningrad Oblast]	0,17	0,34	0,81	2,12	0,15	0,07	0,01	3,66
РФ [Russian Federation]	0,17	0,34	0,61	1,90	0,13	0,04	0,01	3,19

СИГЭДО населения РФ, СПб и ЛО в 2014–2023 гг. за счет медицинского облучения представлены на рисунке 3.

В ЛО и СПб в период с 2014 по 2023 год произошел рост СИГЭДО населения за счет медицинских исследований. В СПб темп роста за исследуемый период времени составил 246,6 %, в ЛО – 232,0 %. В 2023 году СИГЭДО населения в СПб была в 2,4 раза выше, чем в РФ, а в ЛО – в 1,4 раза меньше, чем в РФ. На протяжении всего рассматриваемого

периода времени основной вклад в коллективную дозу медицинского облучения вносила компьютерная томография.

Наиболее значительный вклад в величину среднего индивидуального пожизненного радиационного риска (СИПРР) для населения СПб и ЛО в 2014–2023 гг. вносило облучение радоном и его дочерними продуктами распада (ДГР). Динамика изменения СИПРР от воздействия радона на население СПб и ЛО в 2014–2023 гг. представлена на рисунке 4.

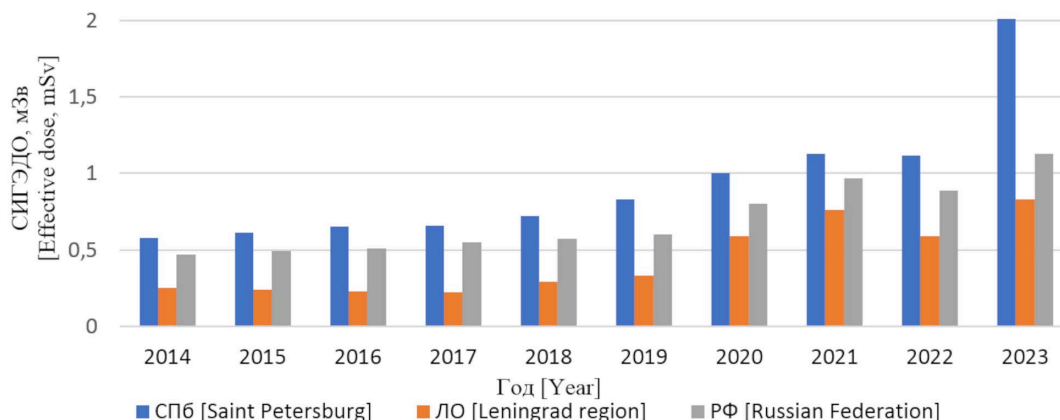


Рис. 3. СИГЭДО населения РФ, СПб и ЛО в 2014–2023 гг. за счет медицинских источников, мЗв

[Fig. 3. Effective doses to the population of the Russian Federation, Saint Petersburg and Leningrad Oblast in 2014–2023 due to medical sources, mSv]

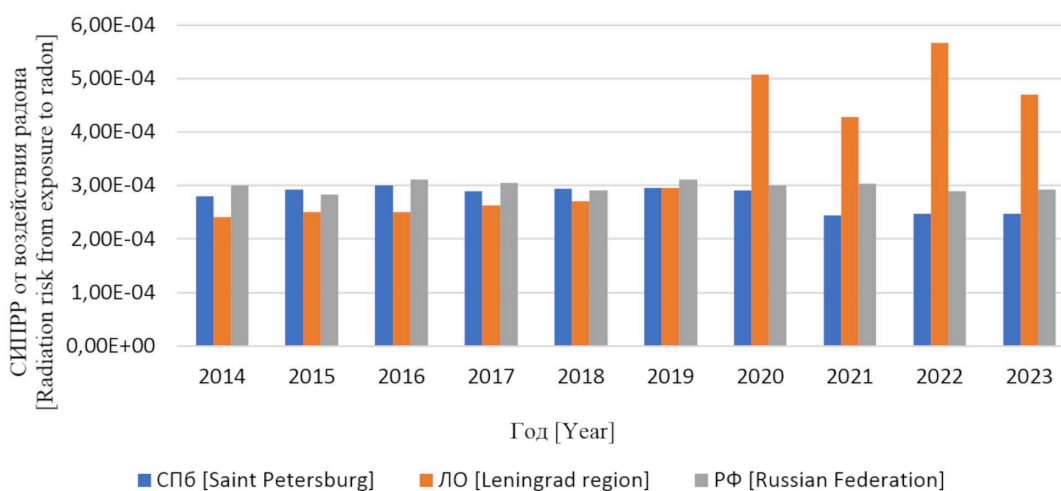


Рис. 4. СИПРР от воздействия радона на население РФ, СПб и ЛО в 2014–2023 гг.

[Fig. 4. Radiation risk for the population of the Russian Federation, Saint Petersburg and Leningrad Oblast in 2014–2023 from exposure to radon]

Радиационный риск для населения за счет воздействия радона и его ДПР за весь анализируемый период времени и в СПб, и в ЛО находился на верхней границе приемлемого риска. Максимальное значение СИПРР за счет воздействия радона в СПб составило  $3,0 \cdot 10^{-4}$  в 2016 и в 2019 годах, в ЛО –  $5,7 \cdot 10^{-4}$  в 2022 году. Рост значений радиационного риска от воздействия радона и его ДПР в ЛО с 2020 года связан с реализацией в данном субъекте научно-исследовательских работ по гигиенической оценке уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий. В результате выполнения таких работ был проведен большой объем измерений содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий ряда районов области, при этом заметная доля результатов оказалась не только выше многолетнего средне-регионального значения, но и выше установленных гигиенических нормативов [15, 16]. В дальнейшем, когда этот массив результатов был внесен в региональные и федеральные банки данных ЕСКИД и РГП, это привело к росту среднерегionalного значения и, соответственно, дозы за счет облучения радоном. Что, в свою очередь, привело к росту значения СИПРР. При этом необходимо помнить,

что для каждого отдельного года результаты оценки СИПРР для населения за счет воздействия радона в значительной степени зависят от выборки объектов, на которых проводилось измерение радона в отчетном году.

Вторым по вкладу в величину СИПРР для населения СПб и ЛО в 2014–2023 гг. стало медицинское облучение. Динамика изменения СИПРР на одного жителя в РФ в целом, СПб и ЛО в 2014–2023 гг. за счет медицинского облучения пациентов представлена на рисунке 5.

На протяжении всех оцененных лет СИПРР за счет медицинского облучения пациентов в СПб превышал соответствующие значения в ЛО и РФ. Максимальное значение СИПРР в СПб составило  $8,7 \cdot 10^{-5}$  в 2023 году, в ЛО –  $3,4 \cdot 10^{-5}$  в 2023 году. Для СПб с 2014 года характерно постоянное повышение уровня радиационного риска, что связано с внедрением в медицинскую практику современных высокодозовых методов диагностических исследований, а также использование компьютерной томографии в качестве одного из основных способов диагностики во время пандемии COVID-19.

Динамика изменения СИПРР для персонала радиационных объектов вследствие профессиональной деятельности в РФ в 2014–2023 гг. представлена на рисунке 6.

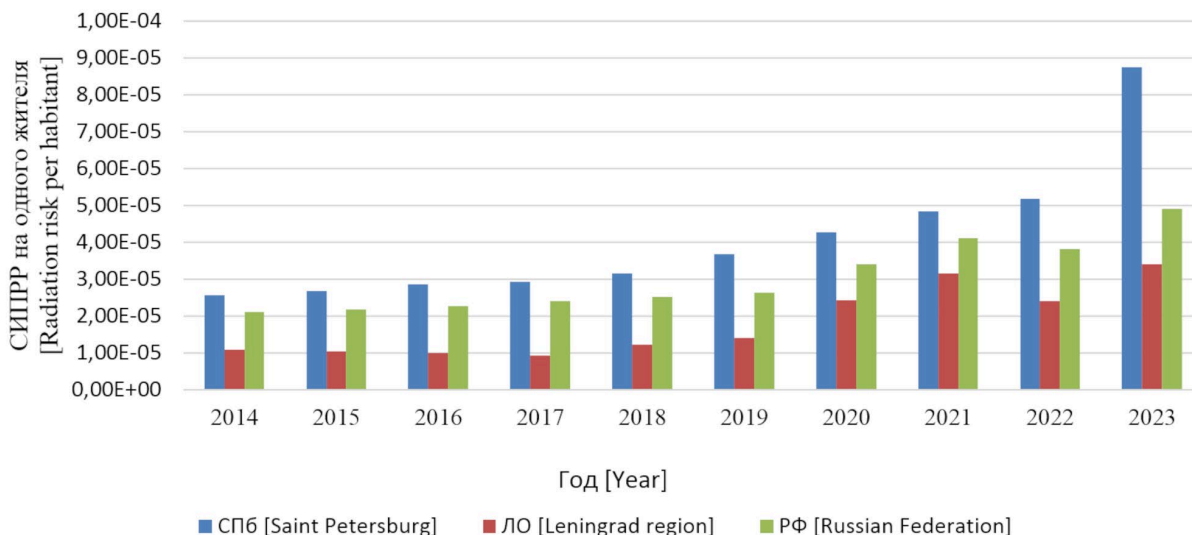


Рис. 5. СИПРР для населения РФ, СПб и ЛО в 2014–2023 гг. за счет медицинского облучения пациентов  
 [Fig. 5. Radiation risk for the population of the Russian Federation, Saint Petersburg and Leningrad Oblast in 2014–2023 from medical exposure]

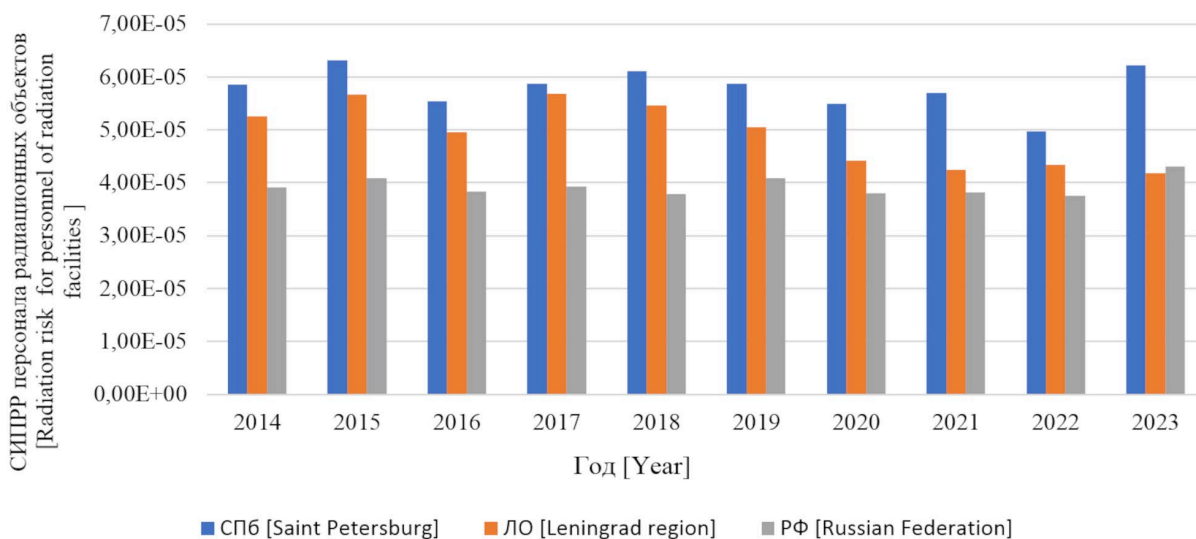


Рис. 6. СИПРР для персонала радиационных объектов за счет производственного техногенного облучения в РФ, СПб и ЛО в 2014–2023 гг.

[Fig. 6. Radiation risk for personnel of radiation facilities due to occupational technogenic exposure in the Russian Federation, Saint Petersburg and Leningrad Oblast in 2014–2023]

СИПРР для персонала на протяжении всех оцененных лет находится в диапазоне предельно допустимого риска, что свидетельствует о приемлемом уровне радиационной безопасности персонала в исследуемых регионах. При этом и в СПб, и в ЛО СИПРР для персонала на протяжении всего оцениваемого периода времени превышал среднероссийский (в 2015 году до 2,9 раз для СПб и до 2,6 для ЛО). Превышение среднероссийских показателей связано с наличием «высокодозовых» рабочих мест и широким использованием ИИИ в промышленности и здравоохранении в данных регионах.

Динамика изменения СИПРР для населения ЛО и РФ, проживающего на радиоактивно загрязненных террито-

риях, в 2014–2023 гг. за счет техногенного облучения представлена на рисунке 7.

В 2014–2023 гг. СИПРР для населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях в ЛО, оставался пренебрежимо малым и был ниже, чем в РФ в целом.

Динамика изменения СИПРР для населения ЛО и РФ, проживающего в зонах наблюдения радиационно-опасных объектов, в 2014–2023 гг. за счет техногенного облучения представлена на рисунке 8.

В 2014–2023 гг. в ЛО радиационный риск для населения, проживающего на радиоактивно-загрязненных территориях, за счет техногенного облучения находился на уровне пренебрежимо малом.

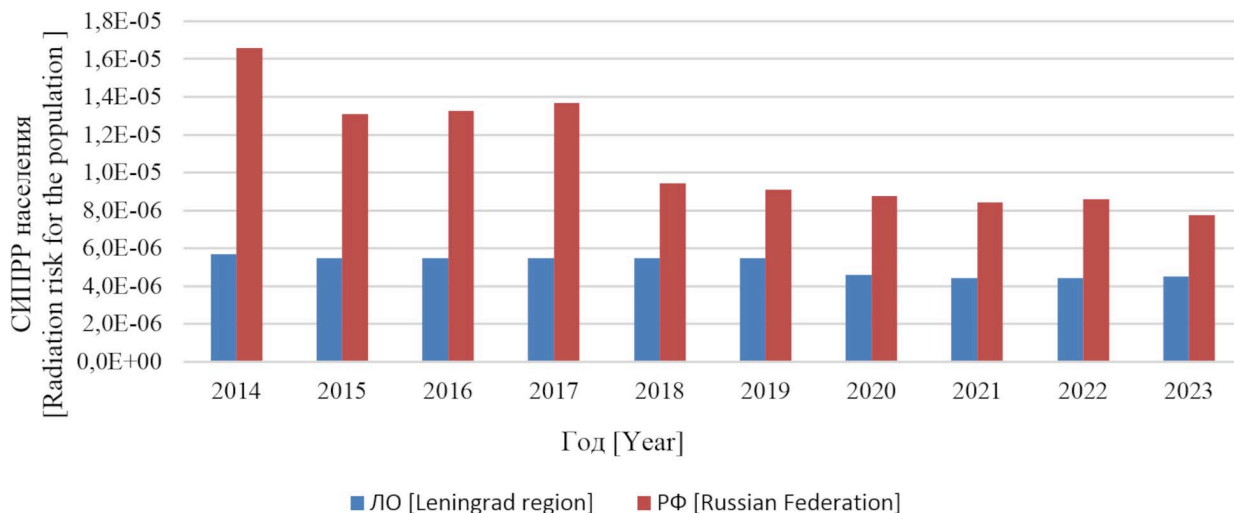


Рис. 7. СИПРР для населения ЛО и РФ, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях, за счет техногенного облучения в 2014–2023 гг.

[Fig. 7. Radiation risk for the population of the Russian Federation and Leningrad Oblast inhabiting radioactively contaminated territories due to technogenic exposure in 2014–2023]

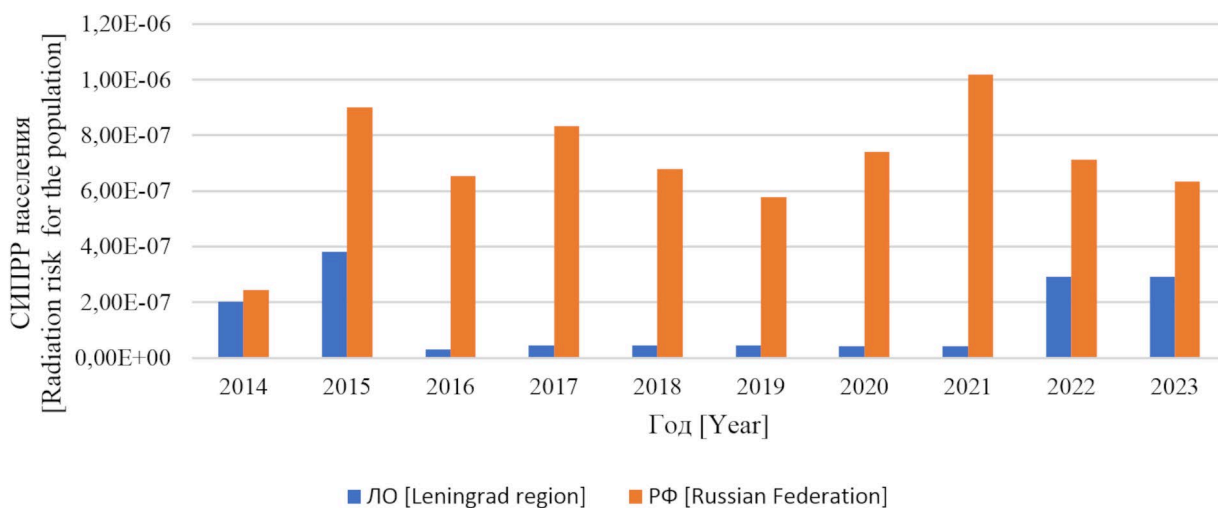


Рис. 8. СИПРР для населения РФ и ЛО, проживающего в зонах наблюдения радиационных объектов, за счет техногенного облучения в 2014–2023 гг.

[Fig. 8. Radiation risk for the population of the Russian Federation and Leningrad Oblast inhabiting surveillance zones of radiation facilities due to technogenic exposure in 2014–2023]

**Заключение**

В целом радиационная обстановка в СПб и ЛО остается удовлетворительной и стабильной. Объекты использования атомной энергии заметного влияния на СИГЭДО населения регионов не оказывают. Дозовые нагрузки персонала группы А в обоих регионах оставались существенно ниже установленных годовых пределов. СИГЭДО населения за счет всех источников в 2014–2023 гг. варьировалась в пределах 3,8–5,2 мЗв/год в Санкт-Петербурге и 3,2–4,2 мЗв/год в Ленинградской области. Природные и медицинские источники вносят наибольший вклад в дозу облучения населения, а также являются наиболее значимыми факторами радиационного риска для здоровья населения. Для этих видов облучения организация мероприятий по снижению рисков

является наиболее целесообразной. Техногенное облучение населения на радиоактивно загрязненных территориях и в зонах наблюдения радиационных объектов в Ленинградской области в 2014–2023 гг. оставалось на низком уровне.

Практически значимыми направлениями снижения рисков являются разработка и реализация региональных радионных программ, а также оптимизация и обоснование рентгенорадиологических исследований.

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

Библин А.М. – разработка дизайна исследования, анализ литературных источников, написание текста статьи.

**Информация о конфликте интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Сведения об источнике финансирования**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Литература**

1. 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.
2. Ракитский В.Н., Кузмичев М.К., Клепиков О.В. и др. Сравнительная оценка средних доз облучения населения Иркутской и Воронежской областей по данным ЕСКИД // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 72–78. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-72-78.
3. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2013 году: информационный сборник. СПб., 2014. 60 с.
4. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002-2015 гг.: информационный сборник. СПб., 2015. 40 с.
5. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информационный сборник. СПб., 2016. 73 с.
6. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб., 2017. 78 с.
7. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информационный сборник. СПб., 2018. 69 с.
8. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб., 2019. 72 с.
9. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб., 2020. 70 с.
10. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: информационный сборник. СПб., 2021. 83 с.
11. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году: справочник. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2022. 72 с.
12. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2022 году: справочник. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2023. 66 с.
13. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2023 году: справочник. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2024. 71 с.
14. Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Репин Л.В. Разработка автоматизированной системы оценки радиационных рисков населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации территорий // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 114–121. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-114-121.
15. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А. и др. Результаты выборочного обследования содержания радона в помещениях детских дошкольных и школьных организаций Ленинградской области // Здоровье населения и среда обитания. 2017. № 10 (295). С. 46–49.
16. Васильев А.С. Облучение обучающихся и сотрудников детских учреждений Ленинградской области природными источниками излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 65–77. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.

Поступила: 22.01.2026

**Библин Артём Михайлович** – старший научный сотрудник, руководитель информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, ул. Мира, д. 8, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: a.biblin@niirg.ru  
ORCID: 0000-0002-3139-2479

**Для цитирования:** Библин А.М. Гигиеническая оценка уровней, структуры доз облучения и радиационных рисков населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 123–130. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-123-130

**Radiation doses and radiation risks for the population of Saint Petersburg and Leningrad Oblast**

**Artem M. Biblin**

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

*Annual assessment of population exposure levels and dose structure is required to identify priority exposure situations and to substantiate radiation risk management measures at the level of a constituent entity of the Russian Federation. Aim of the study: to provide a comparative hygienic assessment of exposure levels and dose structure for the populations of Saint Petersburg and Leningrad Oblast in 2014–2023 and to compare associated health risks. Materials and Methods: radiation-hygienic passports of Saint Petersburg and Leningrad Oblast for 2014–2023 were analyzed, together with data from the Federal repository of radiation-hygienic passports, the compilations Doses of Radiation Exposure of the Population of the Russian Federation, and the reference series Radiation Situation in the Territory of the Russian Federation; mean individual*

**Artem M. Biblin**

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

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

lifetime radiation risk indices were calculated in accordance with MR 2.6.1.0145-19. Results and Discussion: over the study period, the average individual annual effective dose from all sources was 3.8–5.2 mSv in Saint Petersburg and 3.2–4.2 mSv in Leningrad Oblast. In 2023, contributions from natural sources reached 72 % and 89 %, respectively; medical exposure accounted for 27 % and 11 %, while other sources contributed less than 1 %. In 2014–2023, medical exposure doses increased (growth rates of 246.6 % in Saint Petersburg and 232.0 % in Leningrad Oblast), with computed tomography providing the main contribution to the collective dose. Radon exposure made the largest contribution to the mean individual lifetime radiation risk in both regions; the risk attributable to medical exposure was higher in Saint Petersburg than in Leningrad Oblast (maximum  $8.7 \times 10^{-5}$  in 2023 versus  $3.4 \times 10^{-5}$  in Leningrad Oblast). Technogenic exposure of the population in contaminated areas and within surveillance zones of radiation facilities remained low ( $\leq 0.1$  mSv and  $\leq 0.006$  mSv). Conclusion: The findings obtained refine regional prevention priorities, including development and implementation of regional radon programs as well as justification and optimization of X-ray examinations.

**Key words:** radiation doses, population, occupationally exposed workers, radiation risk, Saint Petersburg, Leningrad Oblast.

### Authors' personal contribution

Biblin A.M. – study design, literature search on the topic, writing of the article text.

### Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

### Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

### References

- 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).
- Rakitsky VN, Kuzmichev MK, Klepikov OV, Kurenkova GV. Comparative evaluation of average doses of radiations of population of Irkutsk and Voronezh regions according to “Unified state system of control of individual doses”. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 72–78. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-72-78.
- Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2013. Saint Petersburg; 2014. 60 p. (In Russian).
- Doses to the public of the Russian Federation based on the results of the ESKID in 2002-2015: information bulletin. Saint Petersburg: NIIRG; 2015. 40 p. (In Russian).
- Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2015. Saint Petersburg; 2016. 73 p. (In Russian).
- Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2016. Saint Petersburg; 2017. 78 p. (In Russian).
- Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2017. Saint Petersburg; 2018. 69 p. (In Russian).
- Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2018. Saint Petersburg; 2019. 72 p. (In Russian).
- Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2019. Saint Petersburg; 2020. 70 p. (In Russian).
- Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2020. Saint Petersburg; 2021. 83 p. (In Russian).
- Guide: Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2021. Saint Petersburg; 2022. 72 p. (In Russian).
- Guide: Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2022. Saint Petersburg; 2023. 66 p. (In Russian).
- Guide: Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2023. Saint Petersburg; 2024. 71 p. (In Russian).
- Akhmatdinov RR, Biblin AM, Repin LV. Development of the automated system for assessing radiation risks to the population of the Russian Federation based on the data of radiation-hygienic certification of territories. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 114–121. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-114-121.
- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Balabina TA, Koroleva NA, Istorik OA, et al. Results of sampling analysis of radon content in preschool and school organizations in the Leningrad region. *Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment*. 2017;10(295): 46–49. (In Russian).
- Vasilyev AS. Exposure of students (pupils) and employees of educational institutions in the Leningrad region to natural sources of radiation. Part 1: Results of a comprehensive survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 65–77. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.

Received: January 22, 2026

**For correspondence:** Artem M. Biblin – Senior Research Fellow, Head of Information Analytical Center, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: a.biblin@niirg.ru)

ORCID: 0000-0002-3139-2479

**For citation:** Biblin A.M. Radiation doses and radiation risks for the population of Saint Petersburg and Leningrad Oblast. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 123–130. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-123-130

## Проблемные аспекты обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками излучения

Кормановская Т.А., Кононенко Д.В.

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

*Несмотря на достаточное научное обоснование и определенные успехи, достигнутые Роспотребнадзором в обеспечении радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения, в настоящее время существует ряд нерешенных вопросов, препятствующих полноценному применению на практике действующих санитарно-эпидемиологических требований в части природного облучения. Краткое содержание: В статье дан обзор основных практических проблем, с которыми сталкиваются специалисты Роспотребнадзора в ходе обеспечения радиационной безопасности населения при природном облучении, выполнен анализ причин их возникновения и последствий, оценены перспективы их решения. Показано, что основными практическими проблемными аспектами реализации действующих санитарно-эпидемиологических требований и функционирования системы сбора, учета и контроля данных об уровнях природного облучения являются: снижение объема исследований показателей радиационной безопасности эксплуатируемых зданий; отсутствие ряда расходных материалов для проведения измерений содержания радона в воздухе; недостаточность практических инструментов надзора за продукцией, содержащей природные радионуклиды; отсутствие четкого механизма реализации мероприятий, направленных на снижение природного облучения населения; снижение участия частных испытательных лабораторий в формировании Региональных банков данных доз облучения населения и отсутствие практических механизмов привлечения к ответственности за низкое качество исследований, проводимых лабораториями. Решением описанных проблем могут стать: принятие радоновых программ; рассмотрение вопроса о возобновлении практики оформления санитарно-эпидемиологических заключений на продукцию или внесение отдельных видов продукции в перечень продукции (товаров), подлежащей государственной регистрации; разработка межведомственных документов, определяющих порядок действий при выявлении несоблюдения санитарных требований; организация правового механизма взаимодействия органов Роспотребнадзора и Росаккредитации по вопросам деятельности испытательных лабораторий и применения методического инструментария. Заключение: Решение практических проблем в части обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии природных источников невозможно без согласованной работы федеральных и региональных органов исполнительной власти, включающей четкие механизмы взаимодействия, планирования и реализации мер по снижению уровней облучения населения за счет радона.*

**Ключевые слова:** природные источники ионизирующего излучения, радон, изделия с повышенным содержанием природных радионуклидов, единая государственная система контроля и учета доз облучения граждан, методики радиационного контроля.

### Введение

Выполненный в 2025 г. анализ современного состояния системы обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками ионизирующего излучения (ПИИИ) показал в целом высокий уровень защищенности жителей страны от воздействия природного облучения в коммунальных и производственных условиях [1]. Федеральной службой

по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) в России создана и постоянно совершенствуется нормативно-методическая база, содержащая все необходимые требования в части облучения ПИИИ. Более 25 лет в рамках Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД)<sup>1</sup> действует система сбора, учета и контроля данных об уровнях всех основных параметров природного облучения населения, и функционирует

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

Федеральный банк данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ)<sup>2</sup>, содержащий уникальный массив информации о результатах проводимых на территории страны измерений параметров радиационной обстановки, обусловленной воздействием ПИИИ, который является основой для объективной оценки доз природного облучения населения субъектов Российской Федерации.

Однако, несмотря на достигнутые в ходе деятельности Роспотребнадзора успехи в реализации стратегии радиационной защиты населения от ПИИИ, в настоящее время существует ряд нерешенных вопросов, которые при осуществлении практической деятельности не позволяют в полной мере применить инструменты обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ.

**Цель исследования** – выявить основные проблемные аспекты практической реализации действующих санитарно-эпидемиологических требований в части облучения населения ПИИИ и рассмотреть пути их решения.

### Задачи исследования

1. Выполнить обзор проблемных аспектов практической реализации действующих требований санитарного законодательства и функционирования системы сбора, учета и контроля данных об уровнях природного облучения населения.
2. Выполнить анализ причин возникновения данных аспектов.
3. Оценить последствия невозможности или недостаточной корректности применения на практике отдельных требований санитарного законодательства.
4. Оценить перспективы решения проблемных вопросов в части обеспечения радиационной безопасности населения при облучении ПИИИ и предложить пути их решения.

### Проблемные аспекты обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации в части облучения ПИИИ: обзор, причины, последствия, пути решения

Одной из основных проблем при обеспечении радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ является значительное снижение в последние годы объема исследований показателей радиационной безопасности эксплуатируемых жилых и общественных зданий. Несмотря на установленные санитарными нормами и правилами НРБ-99/2009<sup>3</sup> и СанПиН 2.6.4115-2025<sup>4</sup> гигиенические нормативы мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения и уровней содержания радона в воздухе помещений, а также полноценную методическую базу (МР 2.6.1.0333-23<sup>5</sup>), эксплуатируемые жилые и общественные здания в настоящее время практически выведены из-под радиационного контроля. Причиной сложившейся ситуации в значительной мере является введенный Постановлением Правительства РФ от 10.03.2022 № 336<sup>6</sup> и продленный до 2030 г. Постановлением Правительства РФ от 10.03.2023 № 372<sup>7</sup> мораторий на проведение плановых и внеплановых контрольных мероприятий, проводимых государственными органами, в том числе Роспотребнадзором. Снижение количества контрольно-надзорных мероприятий в эксплуатируемых общественных зданиях (многие из которых, особенно в сельских населенных пунктах, введены в эксплуатацию до утверждения гигиенических нормативов показателей радиационной безопасности зданий) может привести к ситуации многолетнего облучения населения (в том числе детей при нахождении в детских учреждениях) изотопами радона (радоном <sup>222</sup>Rn и тороном <sup>220</sup>Rn) и их короткоживущими дочерними продуктами распада (ДПР) в воздухе помещений в дозах, обуславливающих повышенные и высокие уровни

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

<sup>3</sup>Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

<sup>4</sup>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.)]

<sup>5</sup>Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности: Методические рекомендации МР 2.6.1.0333-23. Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 01.12.2023. [Radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Guidelines MR 2.6.1.0333-23. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 01.12.2023. (In Russ.)]

<sup>6</sup>Постановление Правительства РФ от 10.03.2022 № 336 (ред. от 28.12.2024) «Об особенностях организации и осуществления государственного контроля (надзора), муниципального контроля». [Decree of the Government of the Russian Federation of 10.03.2022 No. 336 (as amended on 28.12.2024) "On the specifics of the organization and implementation of State control (supervision), municipal control". (In Russ.)]

<sup>7</sup>Постановление Правительства РФ от 10.03.2023 № 372 (ред. от 28.12.2024) «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и признании утратившим силу отдельного положения акта Правительства Российской Федерации». [Decree of the Government of the Russian Federation of 10.03.2023 No. 372 (as amended on 28.12.2024) "On Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation and Invalidation of a separate provision of an Act of the Government of the Russian Federation". (In Russ.)]

облучения за счет ПИИИ в соответствии с ОСПОРБ 99/2010<sup>8</sup>. Кроме того, необходимо отметить, что проведение полноценных радоновых обследований зачастую принципиально не может быть организовано в рамках контрольно-надзорных мероприятий с учетом сроков их проведения и определенным ограничением предмета проверок. Негативным последствием облучения изотопами радона и их ДПР является повышенный риск заболеваемости злокачественными новообразованиями органов дыхания, поскольку, согласно выводам доклада Национальной академии наук США 1999 г. «BEIR VI» [2], подтвержденным в 2009 г. Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) [3], радон в воздухе помещений является второй по значимости причиной возникновения рака легкого после табакокурения.

Универсальным решением данной проблемы могло бы стать принятие национальной радоновой программы, аналогичной действовавшей в 1994–2000 гг. Федеральной целевой программе (ФЦП) «Радон»<sup>9</sup>, однако в настоящее время, к сожалению, проекты подобного масштаба, ориентированные на регулирование природного облучения населения Российской Федерации, отсутствуют [4].

Понимая важность контроля природного облучения населения в субъектах Российской Федерации, имеющих потенциально радоноопасные территории, специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (как головной научной организации Роспотребнадзора по вопросам радиационной безопасности населения), не обладая значительными ресурсами, ищут пути выхода из этой ситуации: совместно с Управлениями Роспотребнадзора и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» отдельных субъектов РФ на инициативной основе проводятся радонометрические обследования жилых и общественных зданий (в число которых обязательно включаются детские учреждения). В 2014–2025 гг. в рамках инициативных НИР на безвозмездной основе были выполнены выборочные интегральные измерения объемной активности (ОА) радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий всех 17 районов Ленинградской области; 16 районов Оренбургской области; двух городских образований и двух районов Ивановской области. В 2026–2028 гг. планируется выполнить радонометрические обследования жилых и общественных зданий на территориях, где по данным последних лет не проводятся измерения уровней содержания радона: Ненецкий АО, Республика Дагестан и ряд других. Во всех уже обследованных регионах выявлен ряд фактов превышений гигиенических нормативов содержания радона в воздухе помещений жилого и общественного назначения [5–9]. Выполненная оценка рисков для здоровья населения показала, что

в пяти обследованных районах центральной части Оренбургской области (Беляевском, Октябрьском, Саракташском, Тюльганском и Шарлыкском) от 13 до 29 % случаев заболевания раком легкого среди всего населения могут являться именно радон-индуцированными.

Для проведения радонометрических обследований специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева использовался интегральный метод измерения ОА радона (единственно возможный в текущей ситуации, так как он допускает отправку детекторов в регионы почтой), и был разработан методический инструментарий, позволяющий корректно оценить полученные результаты. Данный метод является наиболее объективным при оценке среднегодовых значений ОА радона в воздухе помещений жилых домов и скрининговым – при обследовании помещений общественных зданий. Таким образом, можно было бы утверждать, что найден паллиативный (в условиях отсутствия национальных программ) способ выполнения достаточно большого массива измерений уровней содержания радона в жилых и общественных зданиях, однако и здесь, к сожалению, есть свои проблемные аспекты.

Говоря об обеспечении контроля содержания радона в воздухе необходимыми средствами измерений (СИ) и расходными материалами к ним, нельзя не упомянуть назревший в стране кризис с интегральными измерениями ОА радона. В Указе 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» (далее – Основы государственной политики) присутствует чрезвычайно важное направление – «развитие научно-производственного потенциала в области использования атомной энергии и его поддержание на уровне, обеспечивающем минимизацию рисков при использовании ядерных технологий, в том числе разработка и применение... контрольно-измерительных приборов для измерения содержания радона и продуктов его распада в жилых помещениях с применением интегральных методов». Проблема состоит в том, что в государственном реестре СИ имеется лишь один соответствующий тип СИ – Комплект аппаратуры для измерения средней объемной активности радона в воздухе трековым методом «ТРЕК-РЭИ-1М» (Россия), в котором в качестве трекового детектора используется нитроцеллюлозная пленка LR-115 Type II, единственное производство которой в мире (Kodak, Франция) было полностью прекращено несколько лет назад, а складские запасы в России исчерпаны [10]. Несмотря на то, что в 2022 г. в России был выдан патент

<sup>8</sup>Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 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.)]

<sup>9</sup>Постановление Правительства РФ от 06.07.1994 № 809 «О федеральной целевой программе снижения уровня облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников на 1994–1996 годы». [Decree of the Government of the Russian Federation of 06.07.1994 No. 809 “On the federal target program for reducing the level of exposure of the Russian population and production personnel from natural radioactive sources for 1994–1996”. (In Russ.)]

на способ получения нитроцеллюлозного детектора альфа-частиц [11], импортозамещение этого важнейшего для обеспечения радиационного контроля расходного материала до сих пор не налажено, поскольку запуск его в производство не только требует значительного объема инвестиций, но и решения большого числа сложных организационных вопросов. Под этот же детектор несколько лет назад был разработан и запатентован интервальный экспозиметр [12], который мог бы оказаться удобным инструментом при радиационном контроле эксплуатируемых зданий с некруглосуточным пребыванием людей в соответствии с МР 2.6.1.0333-23, если бы не возникла проблема с расходными материалами.

Альтернативным вариантом выхода из этой ситуации могла бы стать разработка и утверждение типов СИ, используемых в качестве трекового детектора наиболее распространенный в мире и доступный на данный момент материал CR-39 (полиаллилдигликолькарбонат) [10]. В противном случае после исчерпания запасов пленки LR-115 Type II в тех единичных лабораториях, которые обладают необходимой компетенцией для проведения интегральных измерений ОА радона, массовые долгосрочные радоновые обследования эксплуатируемых зданий в регионах России могут прекратиться на неопределенный срок.

Однако причина, по которой приборостроительные компании не спешат занять эту свободную нишу на рынке измерительного оборудования, по-видимому, состоит в отсутствии государственного заказа на большие объемы интегральных измерений, которые возможны только в рамках федеральной или хотя бы региональных целевых программ [4]. Между тем, охват измерениями содержания радона, в первую очередь, социально значимых объектов, таких как детские учреждения, в целом по стране находится все еще на недостаточном уровне (средний показатель по данным за 2017 г. составил чуть более 30 %) [13].

Значимой проблемой обеспечения радиационной безопасности населения при обращении с материалами и изделиями, содержащими природные радионуклиды (ПРН), является поступление в страну товаров (как правило, произведенных в странах Юго-Восточной Азии) с повышенным содержанием ПРН и отсутствием в сопроводительной документации сведений об уровнях их содержания. При прохождении подобной продукции через таможенные пункты на территории Российской Федерации происходит срабатывание стационарных систем радиационного контроля, далее проводятся расследования этих фактов, выясняются причины и природа ионизирующего излучения, оценивается возможность дальнейшего транспортирования товаров. К такой продукции относятся, например, содержащие оксид тория (2,0 %) вольфрамовые электроды, которые применяются при сварочных работах для увеличения электронной эмиссии, облегчения поджига и стабильности дуги. По данным выполненного специалистами Роспотребнадзора расследования при прохождении партии электродов в 2024 г. через таможенный пост «Южный» (Санкт-Петербург) удельная активность (УА)  $^{232}\text{Th}$  в грузе с учетом неопределенности измерений составила 13700 Бк/кг, что определяет данные изделия как материалы с повышенным содержанием ПРН,

обращение с которыми в производственных условиях должно осуществляться в соответствии с требованиями ОСПОРБ 99/2010. Кроме продукции производственного назначения в страну посредством интернет-заказов поступают также товары с повышенным содержанием ПРН, предназначенные для использования в быту. Примером подобной продукции является бижутерия (медальоны, амулеты, обереги, браслеты, четки и пр.) из вулканических и других магматических пород. Медальоны китайского производства, выполненные из минералов вулканического происхождения с высоким содержанием  $^{232}\text{Th}$ , выявлялись при прохождении таможенного досмотра при поступлении на территорию Российской Федерации в 2012 г. в Челябинской области и Республике Марий Эл, в 2015 г. – в Оренбургской области, в 2016 г. – в Свердловской области, в 2020 г. – в Костромской области. Эффективная удельная активность ПРН (обусловленная высоким содержанием  $^{232}\text{Th}$ ) в данной продукции более чем на порядок превышает установленный в СанПиН 2.6.41.15-25 гигиенический норматив для материалов и изделий, содержащих ПРН, предназначенных для свободного обращения (740 Бк/кг). Необходимо отметить, что предложения на покупку подобных товаров и сейчас широко распространены на популярных российских и китайских маркетплейсах; последствием использования таких товаров является дополнительное облучение людей (не подготавливаемых к создаваемой используемыми предметами повышенной дозе внешнего гамма-излучения) за счет ПИИИ.

Причиной вышеуказанных инцидентов (а кроме них выявлялись также случаи повышенного содержания ПРН в иных товарах народного потребления – матрасах из латекса, гигиенических прокладках и пр.) является, по нашему мнению, прекращение выдачи Роспотребнадзором санитарно-эпидемиологических заключений о соответствии продукции государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормам в связи с вступлением с 01.07.2010 в силу Соглашения таможенного союза по санитарным мерам<sup>10</sup> и началом перемещения товаров в соответствии с новыми правилами таможенного союза. К сожалению, без возвращения указанных практик санитарного надзора за соответствием показателей радиационной безопасности продукции требованиям нормативных документов решение проблемы видится на сегодняшний день сложно выполнимым.

Одной из главных сложностей с обеспечением радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ является отсутствие четко установленного порядка организации и проведения мероприятий, направленных на снижение дозовой нагрузки населения в тех случаях, когда выявляются превышения гигиенических нормативов отдельных факторов природного облучения. К сожалению, как это часто бывает, основной причиной такой ситуации является отсутствие запланированного на подобные мероприятия финансирования со стороны региональных органов исполнительной власти. В качестве решения проблемы можно было бы предложить разработку межведомственного документа (регламента), определяющего единый порядок действий всех служб и организаций, на которых лежит ответственность за соблюдение

<sup>10</sup> Соглашение Таможенного союза по санитарным мерам (Заключено в г. Санкт-Петербурге 11.12.2009; с изменениями на 21.05.2010). Ратифицировано Федеральным законом от 19.05.2010 № 100-ФЗ. [Agreement of the Customs Union on Sanitary Measures (Concluded in St. Petersburg on 11.12.2009; as amended on 21.05.2010). Ratified by Federal Law No. 100-FZ of 19.05.2010. (In Russ.)]

требований санитарных правил, в ситуации выявления превышений установленных гигиенических нормативов.

Среди проблемных аспектов функционирования системы сбора, учета и контроля данных об уровнях природного облучения населения следует выделить наблюдаемую уже в течение ряда лет тенденцию к снижению количества частных испытательных лабораторий (ИЛ), аккредитованных в установленном порядке на измерения параметров радиационной обстановки в части облучения ПИИИ, передающих сведения о результатах соответствующих измерений в Региональные банки данных доз облучения населения за счет природного и техногенно измененного радиационного фона (РБДОПИ), которые функционируют в ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъектах РФ [14]. Следует напомнить, что юридические лица, имеющие лаборатории радиационного контроля, обязаны предоставлять форму федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона»<sup>11</sup>, а нарушение порядка представления статистической информации, а равно представление недостоверной статистической информации влечет ответственность, установленную статьей 13.19 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 № 195-ФЗ, а также статьей 3 закона Российской Федерации от 13.05.1992 № 2761-1 «Об ответственности за нарушение порядка представления государственной статистической отчетности».

Помимо нарушений, связанных с непредоставлением статистической информации, нельзя также не упомянуть гораздо более серьезную проблему в деятельности аккредитованных ИЛ. По сведениям из банка данных радиационных аварий и инцидентов Информационно-аналитического центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности за 2010–2023 гг., в 64 % зарегистрированных радиационных аварий, связанных с нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов, партии металлолома, в которых были обнаружены источники ионизирующего излучения (в 63 % – природный радионуклид <sup>226</sup>Ra), сопровождались протоколами радиационного контроля аккредитованных ИЛ, которые подтверждали соответствие продукции требованиям санитарных норм и правил [15]. Несмотря на то, что ненадлежащее проведение радиационного контроля металлолома или, что еще хуже, фальсификация его результатов, увеличивает риск возникновения радиационных аварий, связанных с переплавкой металлолома, содержащего источники ионизирующего излучения (в том числе природные), на данный момент отсутствует правовой механизм,

посредством которого Федеральная служба по аккредитации (Росаккредитация) по ходатайству органов Роспотребнадзора могла бы приостановить деятельность или аннулировать аттестат аккредитации ИЛ, допустившей такое общественно опасное нарушение. Подобные нарушения являются гораздо более серьезными, чем несоответствие деятельности аккредитованной ИЛ отдельным элементам системы менеджмента качества (которое в настоящее время является основанием для приостановки деятельности ИЛ Росаккредитацией), поскольку потенциально может привести к угрозе жизни и здоровью населения [16].

Определенное беспокойство вызывают также учащиеся в последние несколько лет случаи, когда коммерческие организации проводят аттестацию и вносят в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений методики радиационного контроля различных объектов, в отношении которых санитарными правилами установлены обязательные требования, и при этом в назначении методик фигурирует санитарно-эпидемиологическая оценка<sup>12</sup>. Радиационный контроль, который проводится с целью дальнейшей санитарно-эпидемиологической оценки объектов, является формой подтверждения соответствия объектов обязательным требованиям (п. 5.1.7 НРБ-99/2009), и здесь следует напомнить, что руководства по соблюдению обязательных требований, к которым относятся методические документы, утверждаются руководителем федерального органа исполнительной власти, осуществляющего полномочия по государственному контролю (надзору), в соответствии с Федеральным законом № 247-ФЗ<sup>13</sup>.

Формально процедура разработки методики измерений включает в себя организацию и проведение теоретических и экспериментальных исследований по оценке показателей точности методики и ее экспериментальное опробование<sup>14</sup>, но какая-либо информация о разработке и научном обосновании упомянутых выше методик в научной литературе на данный момент отсутствует. Точность определения показателей не тождественна обоснованности самой процедуры организации и проведения обследования. Здесь надо отметить, что методические рекомендации по радиационному контролю, разрабатываемые и утверждаемые Роспотребнадзором, являются научно обоснованными [17–19], свободно доступными, нацелены на получение максимальной объективной информации о радиационной обстановке (а не только на сокращение трудовых затрат ИЛ на проведение обследований, о чем недвусмысленно говорит, например,

<sup>11</sup> Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона». Утверждена приказом Федеральной службы государственной статистики от 16.10.2013 № 411. [Federal statistical form No. 4-DOZ "Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background". Approved by the order of the Federal State Statistics Service of 16.10.2013 No. 411. (In Russ.)]

<sup>12</sup> Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. [Federal Information Fund for ensuring the uniformity of measurements.] URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/1422460>; <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/1423739> (Дата обращения: 20.01.2026) [Accessed 20 Jan 2026. (In Russ.)]

<sup>13</sup> Статья 14 Федерального закона от 31.07.2020 № 247-ФЗ «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» (ред. от 28.02.2025). [Federal Law No. 247-FZ of 31.07.2020 "On Mandatory Requirements in the Russian Federation" (as amended on 28.02.2025), Article 14. (In Russ.)]

<sup>14</sup> ГОСТ Р 8.563–2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений». Утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 15.12.2009 № 1253-ст. [National Standard of the Russian Federation GOST R 8.563–2009 "State system for ensuring the uniformity of measurements. Procedures of measurements". Approved and put into effect by the order of Rosstandart of 15.12.2009 No. 1253-st. (In Russ.)]

перечень типов СИ содержания изотопов радона в воздухе, которые могут применяться в рамках упомянутых выше методик), определяют только порядок организации и проведения обследований и дальнейшей санитарно-эпидемиологической оценки их результатов, и не ограничивают ИЛ в выборе типов СИ, если те удовлетворяют определенным требованиям к метрологическим и техническим характеристикам, влияющим на качество измерительной информации. При этом непосредственное измерение физических величин выполняется в соответствии с эксплуатационной документацией на СИ или методиками измерений, поставляемыми производителями оборудования в комплекте с измерительными комплексами.

Таким образом, имеются достаточно обоснованные опасения, что определенные пробелы в законодательстве об обеспечении единства измерений эксплуатируются для того, чтобы ИЛ могли формально обеспечить соответствие своей деятельности требованиям Федерального закона № 102-ФЗ<sup>15</sup>, но никак не получить максимально объективную информацию о показателях радиационной обстановки в зданиях, сооружениях и на участках территории.

### Выводы

Объединяя вышесказанное, приведем перечень наиболее актуальных в настоящее время, по нашему мнению, проблемных аспектов обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении ПИИИ:

- снижение объема исследований показателей радиационной безопасности эксплуатируемых жилых и общественных зданий;
- недостаточное техническое обеспечение контроля содержания радона в воздухе необходимыми СИ и дефицит расходных материалов к ним;
- недостаточность практических инструментов надзора за продукцией, содержащей ПРН;
- отсутствие четкого механизма реализации мероприятий, направленных на снижение облучения населения за счет отдельных ПИИИ;
- снижение участия частных ИЛ в формировании РБДОПИ;
- отсутствие практических механизмов привлечения к ответственности за низкое качество исследований, проводимых ИЛ;
- недостаточная правовая компетентность ИЛ в вопросах организации и проведения радиационного контроля некоторых объектов, в отношении которых санитарными правилами установлены обязательные требования.

Решением перечисленных проблем, затрудняющих практическую реализацию действующих санитарно-эпидемиологических требований в части облучения населения ПИИИ, могут стать:

- принятие национальных радоновых программ (на федеральном и региональных уровнях), аналогичных ФЦП «Радон»;

- рассмотрение вопроса о возобновлении практики оформления санитарно-эпидемиологических заключений о соответствии (несоответствии) продукции, в которой нормируется содержание природных радионуклидов, действующим санитарно-эпидемиологическим требованиям; в качестве альтернативного варианта – внесение отдельных видов продукции в Перечень продукции (товаров), подлежащей государственной регистрации (раздел II Единого перечня продукции (товаров), подлежащей государственному санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) на таможенной границе и таможенной территории Евразийского экономического союза<sup>16</sup>) с условием ввоза и обращения продукции (товаров) при наличии документа, подтверждающего ее безопасность;

- разработка межведомственных документов (регламентов), определяющих порядок действий служб и организаций при выявлении несоблюдения требований санитарных правил в части облучения ПИИИ;

- организация правового механизма взаимодействия органов Роспотребнадзора и Росаккредитации по вопросам деятельности ИЛ и применения методического инструментария.

### Заключение

В настоящем материале дан обзор основных проблемных аспектов практической реализации действующих санитарно-эпидемиологических требований в части облучения населения ПИИИ и функционирования системы ЕСКИД об уровнях природного облучения населения; выполнен анализ причин их возникновения, оценены перспективы решения ряда вопросов в части обеспечения радиационной безопасности населения при облучении ПИИИ. Для полноценной практической реализации действующих санитарно-эпидемиологических требований в части облучения населения ПИИИ необходимо усовершенствовать механизмы взаимодействия органов исполнительной власти различных уровней, тем самым обеспечив соблюдение Основ государственной политики: «Государственная политика в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности осуществляется посредством скоординированной и целенаправленной деятельности органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, Госкорпорации «Росатом», организаций и граждан».

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

Кормановская Т.А. и Кононенко Д.В. в равной степени принимали участие в определении цели и задач работы, поиске и анализе литературных источников, написании черновика и окончательного варианта рукописи.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

<sup>15</sup>Часть 1 статьи 5 Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (ред. от 08.08.2024). [Federal Law No. 102-FZ of 26.06.2008 "On Ensuring the Uniformity of Measurements" (as amended on 08.08.2024), Part 1 of Article 5. (In Russ.)]

<sup>16</sup>Единый перечень продукции (товаров), подлежащей государственному санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) на таможенной границе и таможенной территории Евразийского экономического союза. Утвержден Решением Комиссии таможенного союза от 28.05.2010 № 299. [A single list of products (goods) subject to state sanitary and epidemiological supervision (control) at the customs border and the customs territory of the Eurasian Economic Union. Approved by the Decision of the Customs Union Commission of 28.05.2010 No. 299. (In Russ.)]

### 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. Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Оценка системы обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками ионизирующего излучения // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 132–140. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-132-140.
2. National Research Council. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999. 516 p.
3. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva: WHO Press, 2009. 110 p.
4. Маренный А.М. О возможности сокращения в России заболеваемости раком легкого, инициированного радоном. Размышления и предложения. М.: Директ-Медиа, 2025. 276 с.
5. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А. и др. Результаты выборочного обследования содержания радона в помещениях детских дошкольных и школьных организаций Ленинградской области // Здоровье населения и среда обитания. 2017. № 10 (295). С. 46–49.
6. Васильев А.С. Облучение обучающихся и сотрудников детских учреждений Ленинградской области природными источниками излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 65–77. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.
7. Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е. и др. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования населенных пунктов восточных районов Оренбургской области // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 6–18. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18.
8. Кормановская Т.А., Гаевой С.В., Бондарь Л.В. и др. Уровни содержания радона в жилых и общественных зданиях западных районов Оренбургской области с высокими показателями заболеваемости населения злокачественными новообразованиями органов дыхания // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 38–48. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-38-48.
9. Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Васильев А.С. и др. Объемная активность радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий городов Иваново и Кохма Ивановской области // 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. 151–154.
10. Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. К вопросу регулирования радона в Российской Федерации. Дискуссия по материалам публикации «Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению» // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 128–137. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-128-137.
11. Маренный А.М., Яруллин Р.Н., Новиков С.В. и др. Пат. № 2769336, Российская Федерация, МПК C08J 5/18, G03F 1/62, B05C 3/09. Способ получения нитроцеллюлозного детектора альфа-частиц. Заявл. 30.08.2021. Оpubл. 30.03.2022 Бюл. № 10.
12. Маренный А.М., Лукьянов С.Г., Маренный М.А., Нефедов Н.А. Пат. № 2731592, Российская Федерация, МПК G01T 1/00. Интегральный радиометр радона с диэлектрическим трековым детектором. Заявл. 02.09.2019. Оpubл. 04.09.2020 Бюл. № 25.
13. Кормановская Т.А., Историк О.А., Романович И.К. и др. Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений зданий детских учреждений // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
14. Кормановская Т.А., Ахматдинов Р.Р., Горский Г.А. Итоги 20 лет функционирования Федерального банка данных по дозам природного облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 112–125. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125.
15. Громов А.В., Библин А.М., Седнев К.А., Ахматдинов Р.Р. Радиационные аварии, связанные с нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов, в Российской Федерации в 2010–2023 гг. // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 117–125. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-117-125.
16. Библин А.М., Ахматдинов Р.Р., Варфоломеева К.В., Репин Л.В. Проблемы риск-коммуникации по вопросам радиационной безопасности: анализ материалов в сети Интернет после радиационной аварии на Электростальском заводе тяжелого машиностроения // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 43–52. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-43-52.
17. Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Новые методические рекомендации по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Часть 1 // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 138–147. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-138-147.
18. Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Новые методические рекомендации по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Часть 2 // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 108–116. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-108-116.
19. Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Новые методические рекомендации по радиационному контролю участков территории для их санитарно-эпидемиологической оценки по показателям радиационной безопасности // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 112–120. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-112-120.

Поступила: 22.01.2026

**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

**Кононенко Дмитрий Викторович** – научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0002-1392-1226

**Для цитирования:** Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. Проблемные аспекты обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками излучения // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 131–139. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-131-139

---

## Issues of ensuring public radiation safety related to exposure to natural sources of ionizing radiation in the Russian Federation

Tatyana A. Kormanovskaya, Dmitry V. Kononenko

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

*Despite the sufficient scientific justification and certain successes achieved by Rospotrebnadzor in ensuring the radiation safety of the population when exposed to natural radiation sources, there are currently a number of unresolved issues that prevent the full application of existing sanitary and epidemiological requirements regarding natural radiation in practice. Summary: The paper presents an overview of the main practical issues faced by Rospotrebnadzor specialists in the course of ensuring radiation safety of the population related to natural sources of exposure, analyzes the causes and consequences of their occurrence, and evaluates the prospects for their solution. It is shown that the main practical issues in implementing current sanitary and epidemiological requirements, and the functioning of the system for collecting, recording and analyzing data on the levels of all major natural sources of public exposure, are: reduction in the number of radiation surveys conducted and measurements taken in existing buildings; unavailability of certain supplies for radon measurements; lack of practical tools for monitoring commodities with elevated concentration of natural radionuclides; lack of a clear procedure for implementing measures aimed at reducing public exposure to natural sources; reduction in the number of private testing laboratories transmitting data to Regional databank of radiation doses to the public; and the lack of practical tools holding the laboratories accountable for the poor quality of surveys conducted and measurements taken. The solution to the described issues may be: the adoption of radon programs; the resumption of the practice of issuing sanitary and epidemiological certificates for commodities or the inclusion of certain types of commodities in the list of products (goods) subject to state registration; the development of interdepartmental documents defining the procedure for handling of non-compliance with sanitary requirements; the development of a legal mechanism for interaction between Rospotrebnadzor and Rosaccreditation on the work of testing laboratories and the application of radiation control methods. Conclusion: Solving practical issues of ensuring public radiation safety related to exposure to natural sources is impossible without the coordinated work of federal and regional executive authorities, including clear mechanisms for interaction, planning and implementation of radon mitigation actions.*

**Key words:** natural sources of ionizing radiation, radon, commodities with elevated concentration of natural radionuclides, Unified State System for Monitoring and Recording Individual Radiation Doses of Citizens.

### Authors' personal contribution

Tatyana A. Kormanovskaya and Dmitry V. Kononenko equally participated in defining the goal and objectives of the study, searching and analyzing literature data, writing the draft and the final version of the manuscript.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

### Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral 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”.

---

### 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

References

- Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Vasilyev AS, Saprykin KA. Assessment of the system of ensurance of public radiation safety in the Russian Federation related to exposure to natural sources of ionizing radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(4): 132–140. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-132-140.
- National Research Council. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington, D.C.: National Academy Press; 1999. 516 p.
- WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva: WHO Press; 2009. 110 p.
- Marennyy AM. On the possibility of reducing the incidence of radon-induced lung cancer in Russia. Reflections and suggestions. Moscow: Direct-Media; 2025. 276 p. (In Russian).
- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Balabina TA, Koroleva NA, Istorik OA, et al. Results of sampling analysis of radon content in preschool and school organizations in the Leningrad region. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment*. 2017;10(295): 46–49. (In Russian).
- Vasilyev AS. Exposure of students (pupils) and employees of educational institutions in the Leningrad region to natural sources of radiation. Part 1: Results of a comprehensive survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 65–77. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.
- Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Vyaltsina NE, Gaevoy SV, Bondar LV, Kononenko DV, et al. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 1: Results of the comprehensive survey of settlements in the eastern districts of the Orenburg region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 6–18. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18.
- Kormanovskaya TA, Gaevoy SV, Bondar LV, Kononenko DV, Saprykin KA, Balabina TA. Indoor radon concentrations in dwellings and public buildings in the western districts of the Orenburg region with increased respiratory system cancer morbidity rates. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(1): 38–48. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-38-48.
- Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Vasilyev AS, Balabina TA, Daricheva OA. Indoor radon concentration in dwellings and public buildings in the cities of Ivanovo and Kokhma, Ivanovo region. 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. 151–154. (In Russian).
- Romanovich IK, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. On the issue of radon regulation in the Russian Federation. Discussion on the materials of the publication “Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation”. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 128–137. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-128-137.
- Marennyy AM, Yarullin RN, Novikov SV, Supryev AV, Gertsen GP. Pat. No. 2769336, Russian Federation, Int. Cl. C08J 5/18, G03F 1/62, B05C 3/09. Method for producing a nitrocellulose alpha particle detector. Appl. 30.08.2021. Publ. 30.03.2022 Bull. № 10.
- Marennyy AM, Lukyanov SG, Marennyy MA, Nefedov NA. Pat. No. 2731592, Russian Federation, Int. Cl. G01T 1/00. Integrated radon radiometer with dielectric track detector. Appl. 02.09.2019. Publ. 04.09.2020 Bull. № 25.
- Kormanovskaya TA, Istorik OA, Romanovich IK, Eremina LA, Koroleva NA, Balabina TA, et al. Radon surveys in the buildings of children institutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 6–20. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
- Kormanovskaya TA, Akhmatdinov RR, Gorskiy GA. Results of the 20-year period of functioning of the Federal Databank on the natural radiation doses to the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 112–125. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125.
- Gromov AV, Biblin AM, Sednev KA, Akhmatdinov RR. Radiation accidents associated with violation of rules of gathering and recycling of ferrous and non-ferrous metal scrap in the Russian Federation in 2010–2023. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(4): 117–125. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-117-125.
- Biblin AM, Akhmatdinov RR, Varfolomeeva KV, Repin LV. Problems of risk communication on radiation safety. Analysis of materials on the Internet after the 2013 radiation accident at the Electrostal Heavy Engineering Works. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 43–52. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-43-52.
- Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Vasilyev AS, Saprykin KA. New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 1. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 138–147. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-138-147.
- Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Vasilyev AS, Saprykin KA. New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 2. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(4): 108–116. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-108-116.
- Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Vasilyev AS, Saprykin KA. New guidelines on radiation survey of land plots for their sanitary assessment in terms of radiation safety indicators. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(1): 112–120. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-112-120.

Received: January 22, 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

**Dmitry V. Kononenko** – Researcher, Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-1392-1226

**For citation: Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V. Issues of ensuring public radiation safety related to exposure to natural sources of ionizing radiation in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 131–139. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-131-139**

## Сезонные колебания мощности амбиентного эквивалента дозы на улицах Санкт-Петербурга

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.

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

*Мощность дозы гамма-излучения в воздухе в какой-либо локации на открытой местности не является постоянной величиной на протяжении года. Эти колебания мощности дозы следует учитывать при оценке дозы внешнего облучения человека. Целью настоящего исследования являлось определение сезонной вариабельности мощности амбиентного эквивалента дозы на улицах города Санкт-Петербурга. Материалы и методы: Для измерений гамма-спектров *in situ* использовали портативный гамма-спектрометр-дозиметр, который размещали в рюкзаке на спине у оператора. Измерения проводили в зимний и летний период на улицах, расположенных в центральной части города. Для сравнения в то же время были проведены измерения спектров на дорожках и газонах в парках города. Результаты исследования и обсуждение: В среднем значения мощности амбиентного эквивалента дозы от природных радионуклидов на улицах зимой были на 6 % ниже таковых летом. Разница была статистически значимой (критерий Вилкоксона для связанных выборок,  $p < 0,01$ ). Более существенные различия между зимним и летним периодами были выявлены в отношении парков: в присутствии снежного покрова толщиной около 20 см мощность амбиентного эквивалента дозы на газонах и дорожках снизилась на 32 % и 29 %, соответственно. Различия между сезонами были статистически значимыми ( $p < 0,05$ ). Сравнительно небольшое снижение мощности амбиентного эквивалента дозы на улицах города зимой объясняется не только уборкой снега с тротуаров и проезжей части, но и тем, что в этой локации некоторая доля гамма-излучения исходит от радионуклидов в стенах домов. Заключение: Сезонные колебания мощности амбиентного эквивалента дозы от природных радионуклидов на улицах города крайне незначительны. Для оценки величины снижения соответствующей мощности дозы внешнего облучения человека на улице в зимний период, по сравнению с летним периодом, можно использовать коэффициент 0,95.*

**Ключевые слова:** мощность амбиентного эквивалента дозы, природные радионуклиды, городская среда, зима, лето.

### Введение

Мощность дозы гамма-излучения в воздухе (МД) в какой-либо локации на открытой местности не является постоянной величиной на протяжении года. Эти колебания МД следует учитывать при оценке дозы внешнего облучения человека<sup>1</sup>. Заметным, но сравнительно кратковременным, природным фактором влияния является выпадение радиоактивных продуктов распада радона (ПРР) из атмосферы на поверхность земли с осадками [1–3]. Для многих регионов наиболее значимым фактором является формирование снежного покрова на почве и других поверхностях в зимний период времени [4–6]. Например, по результатам полевых измерений в сельских населенных пунктах Брянской области установлено, что МД в этот период времени, по сравнению с летним периодом, существенно изменяется с коэффициентом снижения  $0,72 \pm 0,10$  [5].

Разрушение снежного покрова происходит под влиянием в основном природных факторов: увеличение солнечной инсоляции, повышение температуры атмосферного воздуха, выпадение влажных осадков [7, 8]. Для городской среды, в особенности в крупных городах, важным фактором становится целенаправленная деятельность человека: снег с основных открытых городских локаций (улицы и площади) убирают [9], хотя с разной периодичностью и эффективностью. Соответственно и диапазон сезонных изменений МД в городе, по сравнению с сельской местностью, может быть существенно уже.

**Цель исследования** – определение сезонной вариабельности мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД, нЗв/ч) на улицах города Санкт-Петербурга.

### Материалы и методы

Для измерений гамма-спектров *in situ* использовали портативный гамма-спектрометр-дозиметр (ГСД) МКС-АТ6101Д

<sup>1</sup>Прогноз доз облучения населения цезием-137 при его попадании в окружающую среду. Методические указания МУ 2.6.1.3806-22. Утверждены Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации А. Ю. Поповой 2 декабря 2022 г. [Forecast of population exposure doses from cesium-137 when it enters the environment. Methodological Guidelines MU 2.6.1.3806-22. Approved by the Head of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation A. Yu. Popova on December 02, 2022 (In Russ.)]

**Рамзаев Валерий Павлович**

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

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

(фирма «АТОМТЕХ», Беларусь). ГСД размещали в рюкзаке на спине у оператора [10]. Для визуального анализа гамма-спектров и считывания измеренных значений МАЭД применяли программу ATAS Lite («АТОМТЕХ»). Фоновое значение МАЭД<sub>фон</sub> (8 нЗв/ч), которое включало в себя собственный фон прибора и его отклик на космическое излучение, было определено при проведении измерений на льду Финского залива [10]. Мы предполагали, что это значение не меняется в зависимости от сезона. Оно было вычтено из измеренных значений МАЭД; полученная величина обозначена как МАЭД<sub>корр</sub>. Именно эта величина служила предметом анализа и была использована для статистической обработки. МАЭД<sub>корр</sub> представляет собой сумму МАЭД от природных радионуклидов (ПРН), а также от техногенных радионуклидов (при их присутствии в окружающей среде) [10].

На улицах, расположенных в центральной части города, было проведено две серии измерений. В первой серии (2017–2019 гг.) повторные обследования на одних и тех же уличных маршрутах (n = 14) были выполнены летом в сухую погоду и зимой при наличии на газонах в городе устойчивого снежного покрова толщиной 15–20 см. На большинстве (n = 12) уличных маршрутов, обследованных в этой серии в зимнее время, было отмечено присутствие того или иного количества снега и льда на поверхности тротуаров и проезжей части. На двух маршрутах (Невский проспект, четная и нечетная сторона) снег был полностью убран. Для сравнения в то же время были проведены измерения спектров на дорожках и газонах в парках и скверах (n = 7). Во второй серии измерения проводили на двух уличных маршрутах в мониторинговом режиме в течение года (13.11.2023–06.11.2024 гг.) со средним интервалом 6 дней (65 измерений за год на каждом маршруте). Один из маршрутов в основном пролегал в Петроградском районе по Каменноостровскому проспекту – одной из весьма оживленных транспортных ар-

терий города. Второй маршрут включал в себя преимущественно второстепенные небольшие улицы Петроградского района. Измерения проводили как в сухую погоду, так и во время выпадения осадков. Для сравнения в те же дни были выполнены измерения спектров в контрольной точке внутри одной из комнат здания ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Статистическая неопределенность измерения МАЭД не превышала 5 % (95 % вероятность).

### Результаты и обсуждение

При визуальном анализе гамма-спектров, измеренных на улицах и в парках (n = 158), были выявлены пики ПРН ( $^{40}\text{K}$ , радионуклиды рядов  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ ). Пики от техногенных радионуклидов не были обнаружены. Такая же картина была отмечена при анализе спектров, измеренных внутри помещения (n = 65). В этой связи можно обоснованно считать, что величина МАЭД<sub>корр</sub> обусловлена только гамма-излучением от природных радионуклидов [7]. Сравнительный визуальный анализ спектров, измеренных летом и зимой на одних и тех же уличных маршрутах не выявил отчетливых различий в форме распределений импульсов и амплитуде пиков ПРН (рис. 1, панель «улица»). Для парков амплитуда пиков в зимний период в присутствии снежного покрова зимой, по сравнению с летним периодом, была отчетливо меньше во всем изученном спектральном диапазоне (рис. 1, панель «парк»). На спектрах, измеренных во время дождя, по сравнению с таковыми, измеренными на тех же уличных маршрутах в сухую погоду, отмечено увеличение амплитуды пиков, формирование которых полностью или частично происходит за счет гамма-квантов от ПРП:  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$  (рис. 2). Сходные сравнительные спектрограммы для сухой и дождливой погоды приводят и другие авторы, проводившие гамма-спектрометрические исследования *in situ* в Республике Корея [11], Греции [12] и Беларуси [13].

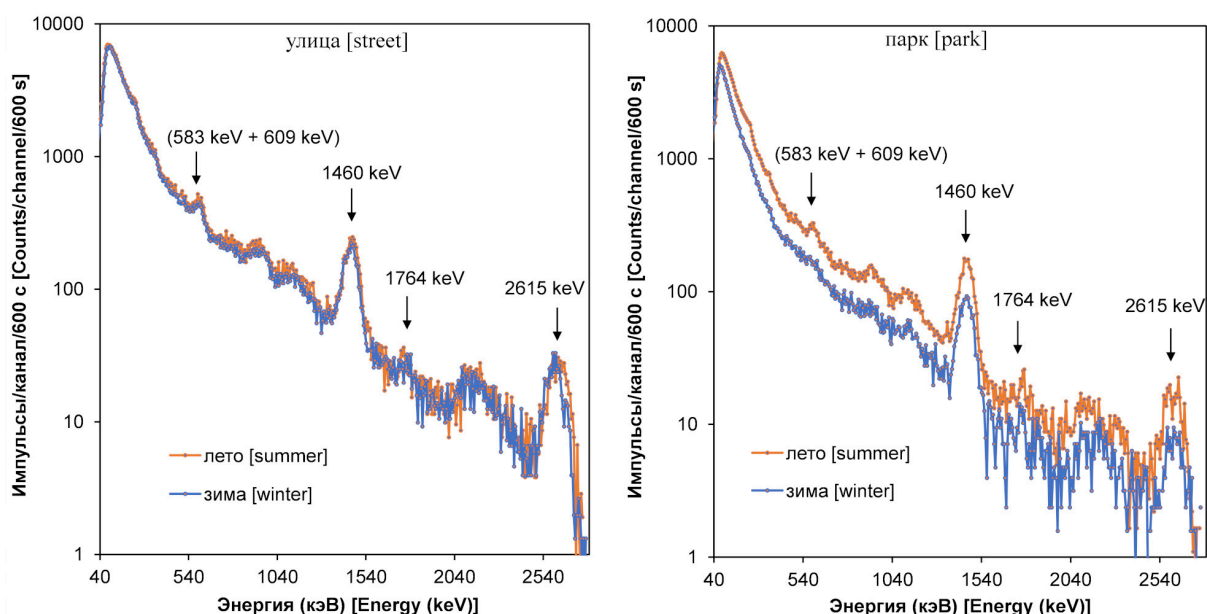


Рис. 1. Гамма спектры, измеренные летом (июнь 2017 г.) и зимой (февраль 2018 г.) на маршрутах по улице Мира (левая панель) и на газоне в Александровском парке (правая панель). Указаны основные пики природных радионуклидов  $^{40}\text{K}$  (1460 кэВ [keV]),  $^{214}\text{Bi}$  (1764 кэВ [keV]),  $^{208}\text{Tl}$  (2615 кэВ [keV]),  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{208}\text{Tl}$  (композитный пик с энергией 583+609 кэВ [keV])

[Fig. 1. Gamma-ray spectra measured on the routes at Mira Street and on the lawn in Aleksandrovsy Park in summer (June 2017) and winter (February 2018). The main gamma peaks of natural radionuclides marked are: 2615 keV of  $^{208}\text{Tl}$ , 1764 keV of  $^{214}\text{Bi}$ , 1460 keV of  $^{40}\text{K}$ , and the composite peak (583+609 keV) of  $^{208}\text{Tl}$  and  $^{214}\text{Bi}$ ]

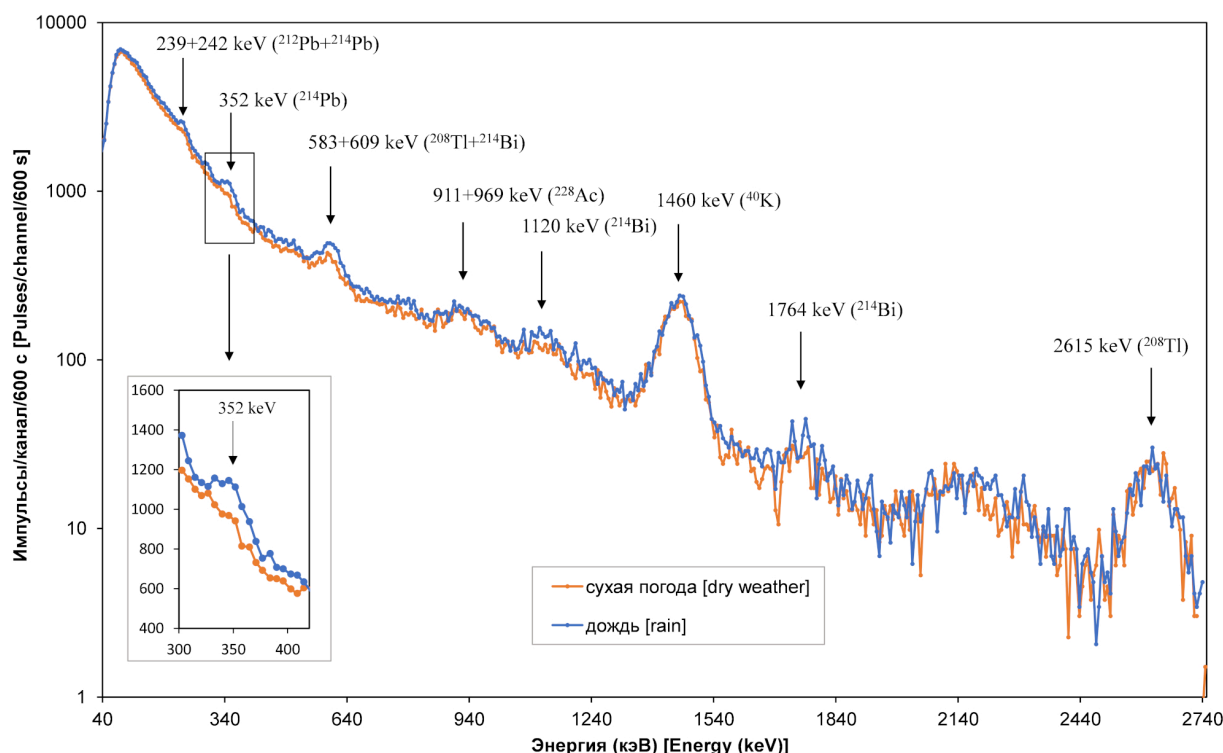


Рис. 2. Гамма спектры, измеренные на маршруте № 2 22.07.2024 г. в сухую погоду и 13.11.2023 во время дождя  
 [Fig. 2. Gamma-ray spectra measured on the route No. 2 22.07.2024 during a period of dry weather and 13.11.2023 during rain]

Результаты статистической обработки данных, полученных в первой серии наблюдений, представлены в таблице 1. В среднем значения МАЭД<sub>кор</sub> на улицах зимой были на 6 % ниже таковых летом. Разница была статистически значимой (критерий Вилкоксона для связанных выборок,  $p < 0,01$ ). Более существенные различия между зимним и летним периодом были выявлены в отношении парков и скверов: в присутствии снежного покрова толщиной около 20 см МАЭД<sub>кор</sub> на газонах и дорожках снизилась на 32 % и 29 % соответственно; это достаточно близко к результатам, полученным для сельских населенных пунктов Брянской области [5]. Различия между сезонами для парков Санкт-Петербурга были

статистически значимыми ( $p < 0,05$ ). Сравнительно небольшое снижение МАЭД<sub>кор</sub> на улицах города зимой и отсутствие заметных различий между полевыми гамма-спектрами в летний и зимний периоды объясняется не только уборкой снега с тротуаров и проезжей части, но и тем, что в этой локации некоторая доля гамма-излучения исходит от радионуклидов в стенах домов (вертикальная поверхность); снежный покров не влияет на эту долю. В парках, расположенных на значительном расстоянии от строений, МАЭД<sub>кор</sub> определяется излучением от радионуклидов в газонах и дорожках, т.е. тех горизонтальных поверхностей, которые зимой покрыты сравнительно толстым слоем снега.

Таблица 1. Мощность AMBIENT EQUIVALENT DOSE RATE (МАЭД<sub>кор</sub>) с учетом поправки на собственный фон прибора и его отклика на космическое излучение (МАЭД<sub>кор</sub>) зимой и летом на улицах и в парках Санкт-Петербурга. Число мест проведения измерений дано в круглых скобках

[Table 1. The ambient dose equivalent rate with correction for the intrinsic noise of the instrument and its response to cosmic radiation (ADER<sub>cor</sub>) on the streets and at the parks of St. Petersburg in winter and summer. The number of measurement sites is given in parentheses]

Параметр [Parameter]	МАЭД <sub>кор</sub> (нЗв/ч) [ADER <sub>cor</sub> (nSv/h)]		Отношение зима/лето [The winter/summer ratio]
	лето [summer]	зима [winter]	
	улица [street] (14)		
Минимум [Minimum]	93	82	0,88
Максимум [Maximum]	187	196	1,05
Медиана [Median]	110	101	0,92
Средняя [Mean]	116	109	0,94
С.о. [SD]	28	32	0,04

Параметр [Parameter]	МАЭД <sub>кор</sub> (нЗв/ч) [ADER <sub>кор</sub> (nSv/h)]		Отношение зима/лето [The winter/summer ratio]
	лето [summer]	зима [winter]	
газон в парке [lawn in park] (7)			
Минимум [Minimum]	58	39	0,57
Максимум [Maximum]	83	57	0,76
Медиана [Median]	67	46	0,69
Средняя [Mean]	70	47	0,68
С.о. [SD]	9	6	0,07
дорожка в парке [path in park] (7)			
Минимум [Minimum]	86	61	0,55
Максимум [Maximum]	175	125	0,86
Медиана [Median]	132	87	0,71
Средняя [Mean]	126	89	0,71
С.о. [SD]	36	25	0,10

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation].

На рисунке 3 графически представлены результаты мониторинговых измерений МАЭД на двух уличных маршрутах и внутри помещения в течение года. Наибольшие значения МАЭД на улицах были зарегистрированы летом в дождливую погоду (эти дни показаны стрелками), что объясняется вымыванием ПРП из атмосферы на поверхность земли. Наименьшие значения были получены при наличии снежного покрова в зимний период. Внутри помещения вариации МАЭД были крайне незначительны и никак не зависели от времени года. Таблица 2 содержит результаты статистической обработки данных второй серии измерений МАЭД<sub>кор</sub>.

Внутри помещения (комната № 327) различий между зимним и летним периодом не обнаружено (U тест Манна-Уитни,  $p > 0,05$ ). На маршруте № 1, пролежавшему по проспекту, который подвергался регулярной и эффективной очистке от снега, МАЭД<sub>кор</sub> летом также не отличались от таковой, измеренной зимой ( $p > 0,05$ ). На маршруте № 2, который пролегал по второстепенным и в отдельные зимние дни весьма заснеженным улицам, МАЭД зимой была в среднем на 7 % меньше, чем таковая летом. Разница была статистически значимой ( $p < 0,05$ ).

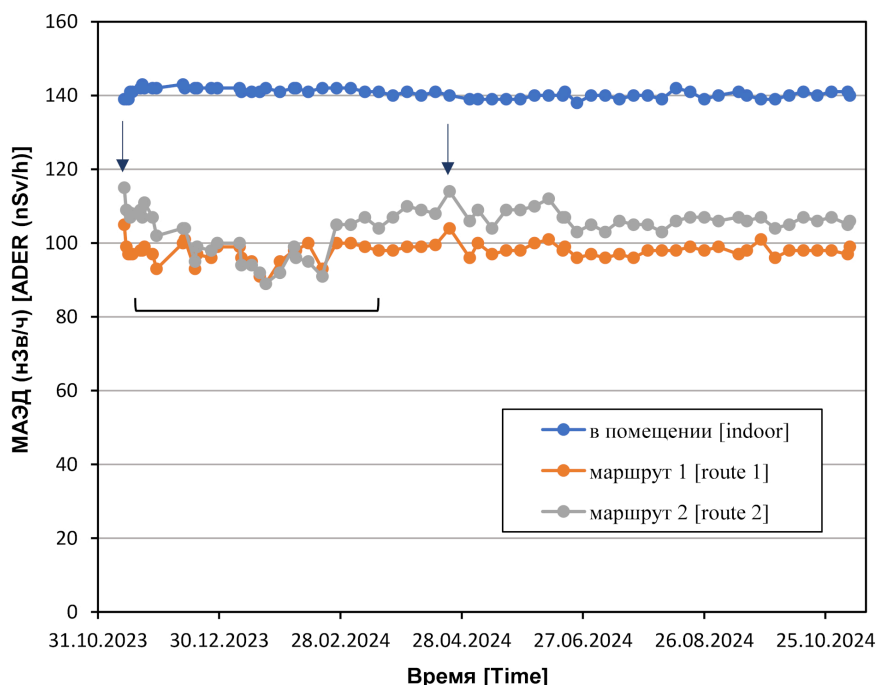


Рис. 3. Колебания мощности AMBIENTного эквивалента дозы (МАЭД) внутри помещения № 327 и на уличных маршрутах 1 и 2 в период наблюдений с 13.11.2023 по 06.11.2024. Стрелки показывают те дни, когда измерения проводили во время дождя.

Горизонтальная скобка охватывает период присутствия снега на газонах в микрорайоне проведения мониторинга

[Fig. 3. Variations in the ambient dose equivalent rate (ADER) indoor (room No. 327) and on outdoor routes 1 and 2 during the observation period from 13.11.2023 to 06.11.2024. Arrows indicate the days when measurements were done during rain.

The horizontal bracket covers the period of snow on the lawns in the monitoring area]

**Таблица 2.** Сводная статистика изменений мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы с учетом поправки на собственный фон дозиметра-спектрометра и его отклика на космическое излучение (МАЭД<sub>кор</sub>) внутри помещения № 327 и на уличных маршрутах 1 и 2 летом (n = 40) и зимой (n = 25) в период наблюдений с 13.11.2023 г. по 06.11.2024 г.

**[Table 2.** Summary statistics of changes in the ambient dose equivalent rate with correction for the intrinsic noise of the dosimeter-spectrometer and its response to cosmic radiation (ADER<sub>cor</sub>) inside room No. 327 and on outdoor routes 1 and 2 in summer (n = 40) and winter (n = 25) during the observation period from 13.11.2023 to 06.11.2024]

Параметр [Parameter]	МАЭД <sub>кор</sub> (нЗв/ч) [ADER <sub>cor</sub> (nSv/h)]					
	комната № 327 [room No. 327]		маршрут 1 [route 1]		маршрут 2 [route 2]	
	лето [summer]	зима [winter]	лето [summer]	зима [winter]	лето [summer]	зима [winter]
Минимум [Minimum]	130	133	88	81	95	81
Максимум [Maximum]	134	135	97	93	107	103
Медиана [Median]	132	134	90	90	99	92
Средняя [Mean]	132	134	90	89	99	92
С.о. [SD]	1	1	2	3	3	6

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation].

### Заключение

Исследование показало, что сезонные колебания МАЭД от природных радионуклидов на улицах Санкт-Петербурга незначительны. Для оценки величины снижения соответствующей мощности дозы внешнего облучения человека на улице в зимний период, по сравнению с летним периодом, можно использовать коэффициент 0,95.

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

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

Барковский А.Н. – концептуализация, редактирование рукописи.

### Информация о конфликте интересов

У авторов отсутствуют конфликты интересов, которые следует раскрывать.

### Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

### Литература

- Livesay R.J., Blessinger C.S., Guzzardo T.F., Hausladen P.A. Rain-induced increase in background radiation detected by radiation portal monitors // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 137. P. 137–141. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.07.
- Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Быков В.М. Влияние короткоживущих радиоактивных изотопов на изменение гамма-фона во время осадков на Европейском Севере России // *Успехи современного естествознания*. 2017. № 6. С. 123–129.
- Charan K.K., Rajendra P.T., Nagaraja K. Study of ambient gamma dose levels at national atmospheric research laboratory, Gadanki, India // *Radiation Protection and Environment*. 2021. Vol. 44, No. 1. P. 28–33. DOI: 10.4103/rpe.rpe\_62\_20.
- Saito K. External doses to terrestrial gamma rays on the snow cover // *Radiation Protection Dosimetry*. 1991. Vol. 35, No. 1. P. 31–39. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a080931.
- Ramzaev V., Yonehara H., Hille R. et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85. P. 205–227. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.04.014.
- Omori Y., Wakamatsu H., Sorimachi A., Ishikawa T. Radiation survey on Fukushima Medical University premises about four years after the Fukushima nuclear disaster // *Fukushima Journal of Medical Science*. 2016. Vol. 62, No. 1. P. 1–17. DOI: 10.5387/fms.2015-16.
- Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. Издательство Академии наук СССР. Москва–Ленинград. 1945. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/183992/text.pdf>. (Дата обращения 27.09.2025).
- Лавров С.А. Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на процессы таяния снежного покрова // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2024. № 1. С. 46–70. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-46-70.
- Как производится уборка в городе в зимний период? URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/blago/obrasheniya-grazhdan/faq/5252/> (Дата обращения 27.09.2025).
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Измерение эффективной удельной активности природных радионуклидов *in situ* для оценки мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы в городской среде // *Радиационная гигиена*. 2025. Т. 18, № 2. С. 132–145. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-132-145.
- Lee M.S. Gamma-ray exposure rate monitoring by energy spectra of NaI(Tl) scintillation detectors // *Journal of Radiation Protection and Research*. 2017. Vol. 42, No 3. P. 158–165. DOI: 10.14407/jrpr.2017.42.3.158.
- Patiris D., Tsabaris C., Livanou K. et al. Atmospheric *in situ* gamma-ray spectrometry for precipitation investigation // *Acta Geophysica*. 2023. Vol. 71. P. 2517–2533. DOI: 10.1007/s11600-023-01090-9.
- Ramzaev V., Bernhardsson C., Vodovatov A. et al. Ambient dose equivalent rates of gamma radiation from natural radionuclides and <sup>137</sup>Cs at grasslands and forests in the area of the Belarusian NPP in the pre-commissioning period (2019) // *Radiation Protection Dosimetry*. 2024. Vol. 200, No 5. P. 496–503. DOI: 10.1093/rpd/ncae016.

Поступила: 07.10.2025

**Рамзаев Валерий Павлович** – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-9502-1751

**Барковский Анатолий Николаевич** – руководитель Федерального радиологического центра, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0009-0007-6179-1394

**Для цитирования:** Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Сезонные колебания мощности амбиентного эквивалента дозы на улицах Санкт-Петербурга // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 140–146. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-140-146

## Seasonal variations of ambient dose equivalent rate on the streets of Saint Petersburg

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

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

*The gamma dose rate in air at any given outdoor location is not constant throughout the year. These fluctuations of the dose rate should be taking into account when assessing external radiation dose to humans. The aim of this study was to determine the seasonal variability of ambient dose equivalent rate on the streets of St. Petersburg. Materials and Methods: A portable gamma spectrometer-dosimeter, carried in a backpack on the operator, was used to measure gamma spectra in situ. Measurements were conducted in summer and winter on the streets located in the central part of the city. For comparison, spectra were measured on paths and lawns of the city parks. Results and Discussion: On average, ambient dose equivalent rates from natural radionuclides on the streets in winter were 6 % lower than those in summer. The difference was statistically significant (Wilcoxon test for the pair samples,  $p < 0.01$ ). More pronounced differences between winter and summer were found in parks: with a snow cover depth of approximately 20 cm, the ambient dose equivalent rate on lawns and paths decreased by 32 % and 29 %, respectively. The differences between the seasons were statistically significant ( $p < 0.05$ ). The relatively small decrease in the ambient dose equivalent rate on the city streets in winter is explained not only by snow removal from sidewalks and roadways but also by the fact that in this location some gamma radiation comes from radionuclides in the walls of buildings. Conclusion: The seasonal variations in the ambient dose equivalent rate from natural radionuclides on the city streets are extremely small. A coefficient of 0.95 can be used to estimate the magnitude of the reduction in the corresponding rate of external exposure to humans on the streets in winter compared to summer.*

**Key words:** ambient dose equivalent rate, natural radionuclides, urban environment, winter, summer.

### Authors' personal contribution

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

Barkovsky A.N. – conceptualization, editing the manuscript.

### Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to declare.

### Sources of funding

The study had no sponsorship.

### References

1. Livesay RJ, Blessinger CS, Guzzardo TF, Hausladen PA. Rain-induced increase in background radiation detected by radiation portal monitors. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014;137: 137-141. DOI 10.1016/j.jenvrad.2014.07.

2. Yakovlev EY, Druzhinin SV, Bykov VM. Impact of the short-lived radon decay products on change of gamma background during precipitation on the European north of Russia. *Uspekhi Sovremennogo Yestestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2017;(6): 123–129. (In Russian).
3. Charan KK, Rajendra PT, Nagaraja K. Study of ambient gamma dose levels at national atmospheric research laboratory, Gadanki, India. *Radiation Protection and Environment*. 2021;44(1): 28–33. DOI: 10.4103/rpe.rpe\_62\_20.
4. Saito K. External doses to terrestrial gamma rays on the snow cover. *Radiation Protection Dosimetry*. 1991;35(1): 31–39. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a080931.

### Valery P. Ramzaev

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

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

5. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.04.014.
6. Omori Y, Wakamatsu H, Sorimachi A, Ishikawa T. Radiation survey on Fukushima Medical University premises about four years after the Fukushima nuclear disaster. *Fukushima Journal of Medical Science*. 2016;62(1): 1–17. DOI: 10.5387/fms.2015-16.
7. Richter GD. Snow cover, its formation and properties. The USSR Academy of Sciences. Moscow–Leningrad. 1945. Available on: <https://www.booksite.ru/fulltext/183992/text.pdf>. (Accessed: 27 September 2025). (In Russian).
8. Lavrov SA. The influence of meteorological factors, snow properties and climate changes on the snow cover melting processes. *Vodnoe Khozaystvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024(1): 46–70. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-46-70. (In Russian).
9. How is city cleaning carried out during the winter? Available on: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/blago/obrasheniya-grazhdan/faq/5252/> (Accessed: 27.09.2025). (In Russian).
10. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Measurement of effective activity concentration of natural radionuclides *in situ* for assessment of ambient dose equivalent rate in urban environments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(2): 132–145. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-132-145.
11. Lee MS. Gamma-ray exposure rate monitoring by energy spectra of NaI(Tl) scintillation detectors. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2017;42(3): 158–165. DOI: 10.14407/jrpr.2017.42.3.158.
12. Patiris D, Tsabaris C, Livanou K, Roumelioti SK, Alexakis S. Atmospheric *in situ* gamma-ray spectrometry for precipitation investigation. *Acta Geophysica*. 2023;71: 2517–2533. DOI: 10.1007/s11600-023-01090-9.
13. Ramzaev V, Bernhardsson C, Vodovatov A, Chipiga L, Nekrasov V, Dvornik A. Ambient dose equivalent rates of gamma radiation from natural radionuclides and <sup>137</sup>Cs at grasslands and forests in the area of the Belarusian NPP in the pre-commissioning period (2019). *Radiation Protection Dosimetry*. 2024;200(5): 496–503. DOI: 10.1093/rpd/ncae016.

Received: October 07, 2025

**For correspondence: Valery P. Ramzaev** – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru)  
ORCID: 0000-0002-9502-1751

**Anatoly N. Barkovsky** – Head of the Federal Radiological Centre, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia  
ORCID: 0009-0007-6179-1394

**For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Seasonal variations of ambient dose equivalent rate on the streets of Saint Petersburg. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No 1. P. 140–146. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-140-146**

## 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!*

- Материалы, представляемые в статье, не должны быть ранее опубликованными в других печатных изданиях. Авторам следует информировать редакцию журнала о том, что какие-то части этих материалов уже опубликованы и могут рассматриваться как дублирующие. В таких случаях в новой статье должны быть ссылки на предыдущие работы. Копии таких материалов прилагаются к рукописи, чтобы редакция имела возможность принять решение, как поступить в данной ситуации. Не допускается направление статей, которые уже напечатаны в других изданиях или представлены для печати в другие издательства.

- Редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи. Все статьи, поступающие в редакцию журнала, проходят двойное слепое рецензирование.

В случае обнаружения недобросовестного поведения со стороны автора, плагиата, фабрикации или фальсификации данных редакция руководствуется правилами COPE. Под недобросовестным поведением мы понимаем любые действия ученого, включающие ненадлежащее обращение с объектами изучения или намеренное манипулирование научной информацией, при котором она перестает отражать наблюдаемые исследования; а также поведение ученого, которое не соответствует принятым этическим и научным стандартам.

К недобросовестному поведению журнал «Радиационная гигиена» не относит честные ошибки или честные расхождения в плане, проведении, интерпретации или оценке исследова-

тельских методов, или результатов, или недобросовестное поведение, не связанное с научным процессом.

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 the 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 прогнозных 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 вло-

жить 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).** Приводится 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 I. 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 не более 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 осо-

бое 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)

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).** В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого – доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательств в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты желательно сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективности. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

При первом упоминании терминов, неоднократно используемых в статье (однако не в заголовке статьи и не в резюме), необходимо давать их полное наименование и сокращение в скобках, в последующем применять только сокращение, однако их применение должно быть сведено к минимуму. Сокращение проводится по ключевым буквам слов в русском написании, например: источник ионизирующего излучения (ИИИ) и т.д. Тип приборов, установок следует вводить на языке оригинала, в кавычках; с указанием (в скобках) страны производителя. Например: использовали спектрофотометр «СФ16» (Россия), спектрофлуориметр фирмы «Hitachi» (Япония). Малоупотребительные и узкоспециальные термины также должны быть расшифрованы.

**Таблицы** должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком и вставляется в текст сразу после ссылки на нее. Следует уточнить, какие параметры статистической вариабельности оценивались, например: стандартное отклонение или стандартная ошибка среднего. Не следует дублировать данные, содержащиеся в таблице, в тексте статьи, в графиках или диаграммах.

Таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Ссылки 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 строки. 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 подрисуночные подписи. Подрисуночная подпись должна быть переведена на английский язык. Подрисуночные 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 рис. 5 продемонстрирована ...» или «График зависимости ... (рис. 5)». Подрисуночная подпись включает порядковый номер рисунка и его название (к примеру: «Рис. 2. Динамика изменения ...»). Выравнивается по центру. Точка после подрисуночной подписи не ставится. Перевод подрисуночной подписи заключают в квадратные скобки (к примеру: «[Fig. 2. Dynamics ...]») и располагают с новой строки после подрисуночной 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.

– **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 планирование научной работы либо в получении, анализе или интерпретации данных работы;

2) составление черновика рукописи или его критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания;

3) окончательное утверждение публикуемой версии рукописи;

4) согласие принять на себя ответственность за все аспекты работы и гарантия того, что все вопросы, связанные с точностью и добросовестностью любой части работы, могут быть надлежащим образом исследованы и урегулированы.

В список авторов не включаются люди, не являющиеся авторами статьи. Имена людей, которые не являются авторами, не отвечают всем четырем критериям, но оказали иную поддержку, указывают в разделе «Благодарности».

*Приводятся на русском и английском языках.*

– **Благодарности (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 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.** Рекомендуемое 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 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

#### **Подстрочные ссылки (сноски):**

<sup>1</sup>СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

<sup>1</sup>МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 “Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations”. Moscow, Rospotrebnadzor, 2011, 40 p. (In Russ.)]

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.mrgc.obninsk/> (Дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия. URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (Дата обращения: 16.06.2019).

**Ссылки на статьи с DOI:**

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии // *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., Сосякин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

**Из газеты:**

Фомин Н.Ф., Иванькович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // *Военный врач*. 1996. № 8 (1332) С. 5.

**Диссертации 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 <sup>137</sup>Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105–113.

Vodovotov AV, Chipiga LA, Piven PA, Trufanov GE, Berkovich GV, Mashchenko IA, et al. Assessment of the absorbed doses in the fetus

from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 126-135. (In Russian).

Morozov SP, Kuzmina ES, Vetsheva NN, Gombolevsky VA, Lantukh ZA, Polishuk NS, et al. Moscow Screening: Lung Cancer Screening With Low-Dose Computed Tomography. *Problemy sotsialnoy gigiyeny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny = Problems of social hygiene, health care and history of medicine*. 2019;27(Special Issue): 630-636. (In Russian). DOI: 10.32687/0869-866X-2019-27-si1-630-636.

**Статья в электронном журнале:**

Errami M, Garner H. A tale of two citations. *Nature*. 2008;451(7177): 397-399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. *Chronicle of Higher Education*. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

**Статья в электронном журнале с DOI:**

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanigan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. *American Journal of Sports Medicine*. 2012;40(12): 2872-2878. Available from: <http://ajs.sagepub.com/content/40/12/2872> DOI: 10.1177/0363546512458223 [Accessed 19 Feb 2013].

**Книга (печатная):**

Carlson BM. Human embryology and developmental biology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2009. 541 p.

**Книга (электронная):**

Shreeve DF. Reactive attachment disorder: a case-based approach. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <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.*

– **Информация об ответственном авторе.** Здесь указывается фамилия, имя, отчество (полностью) ответственного автора на русском языке и в транслитерации, основное учреждение, рабочий адрес с почтовым индексом, рабочий телефон и адрес электронной почты.

*Приводится 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 файлов с текстом статьи, сопроводительными документами и дополнительными материалами на сайт журнала через online форму.

При подаче рукописи должны быть загружены следующие файлы:

1. Текст рукописи (титальный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте [www.translit.ru](http://www.translit.ru), название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые

слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате TIFF, JPEG с разрешением 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.

### 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.

### 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.

ISSN 1998-426X (Print)

ISSN 2409-9082 (Online)