

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 18 № 4, 2025

УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

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

Целью журнала является создание 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. Пантиня
Компьютерная верстка
О.С. Кравцовой

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

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

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

Формат 60x84/8. Печать офсетная. 22 печ. л.
Выход в свет: 30.12.2025

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

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

Научно-практический журнал

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

Издается ежеквартально.

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

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

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



Том 18 № 4, 2025

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

Том 18 № 4, 2025

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

Алексанин 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 Улмас 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)

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)

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

Санжарова Наталья Ивановна – ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агрозоологии 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)

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

FOUNDER & PUBLISHER

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

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

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

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

Objectives:

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

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

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

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

Editorial office address:

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

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

Format: 60x84/8.
Offset printing. 22 printed sheets.
Publication date: 30.12.2025
Circulation: 150 copies

Printed at Amirit LLC Printing House
410004, Saratov, Chernyshevsky St., Bldg. 88, Litera U

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 Juornals), VINITI RAN, RGV, etc. (<https://www.radhyg.ru/jour>)



RADIATION HYGIENE

Vol. 18 № 4, 2025

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)

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 Juhani Sören — Professor at Department of Medical Radiation Physics, Lund University (Malmö, Sweden)

Vasiliy 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. Takhauov — 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)

СОДЕРЖАНИЕ

Том 18 № 4, 2025

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я., Жеско Т.В., Кадука М.В., Кравцова О.С.	
Содержание ^{137}Cs в организме жителей населенных пунктов Брянской области по результатам радиационно-гигиенических обследований	7
Солдатова О.В., Филимонова М.В., Суринова В.И., Шитова А.А., Николаев К.А., Рыбачук В.А., Косаченко А.О., Корякин С.Н., Шегай П.В., Иванов С.А., Каприн А.Д., Филимонов А.С.	
Радиомодифицирующие свойства бромзамещенного производного индол-3-карбоновой кислоты при протонной и электронной терапии карциномы Эрлиха <i>in vivo</i>	19
Водоватов А.В., Чипига Л.А., Библин А.М., Горский Г.А., Лантух З.А., Солдатов И.В., Вишнякова Н.М.	
Требования к обеспечению радиационной безопасности беременных женщин в ситуациях планируемого и аварийного облучения	31
Ахмадуллин Р.М., Шишкина Е.А., Крестинина Л.Ю.	
Половозрастная модель интенсивности курения населения, облученного на Южном Урале	41
ОБЗОРЫ	
Кузьмин С.В., Есаулова О.В., Горина И.Е., Мощенская Н.В., Водоватов А.В.	
Обоснование подходов к гигиеническому нормированию и контролю радиационной обработки пищевой продукции в Российской Федерации	49
Мосеева М.Б., Азизова Т.В.	
Сравнительный анализ радиогенного риска заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца и цереброваскулярных заболеваний в когорте работников, подвергшихся хроническому облучению	58
Горский Г.А., Библин А.М., Водоватов А.В., Вишнякова Н.М.	
Номенклатура медицинских средств противорадиационной защиты, применяемых при крупномасштабных радиационных авариях	70
Шарагин П.А., Толстых Е.И., Шишкина Е.А.	
Оценка морфометрических характеристик гипофиза и окружающих его тканей для создания дозиметрической модели	83
Кадука М.В., Бекяшева Т.А., Иванов С.А., Ступина В.В.	
Вопросы обеспечения соответствия испытательных лабораторий радиационного контроля критериям аккредитации	94
Кузьмин С.В., Есаулова О.В., Мощенская Н.В., Русаков В.Н., Горина И.Е.	
Программно-аппаратный комплекс «Радуризация» и система добровольной сертификации «Добросовестные практики» как основа системы контроля и прослеживаемости Роспотребнадзора в сфере радиационных биотехнологий	103
Соколова А.Б.	
Ключевые аспекты декорпорации плутония и америция в случаях их аварийного поступления персоналу радиационно опасных производств	113

CONTENTS

Vol. 18 № 4, 2025

RESEARCH ARTICLES

Romanovich I.K., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Bruk G.Ya., Zhesco T.V., Kaduka M.V., Kravtsova O.S.	
The current levels of ^{137}Cs in the body of residents of populated areas of the Bryansk region according to the results of radiation and hygienic survey	16
Soldatova O.V., Filimonova M.V., Surinova V.I., Shitova A.A., Nikolaev K.A., Rybachuk V.A., Kosachenko A.O., Koryakin S.N., Shegai P.V., Ivanov S.A., Kaprin A.D., Filimonov A.S.	
Radiomodifying properties of a bromo-substituted derivative of indole-3-carboxylic acid in proton and electron therapy of Ehrlich carcinoma <i>in vivo</i>	28
Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Biblin A.M., Gorsky G.A., Lantukh Z.A., Soldatov I.V., Vishnyakova N.M.	
Requirements for radiation protection of pregnant women in planned and emergency exposure situations	39
Akhmadullin R.M., Shishkina E.A., Krestinina L.Yu.	
Age-sex model of smoking intensity for the population exposed to radiation in the Southern Urals	47
REVIEWS	
Kuzmin S.V., Esaulova O.V., Gorina I.E., Moshchenskaya N.V., Vodovatov A.V.	
Justification of approaches to hygienic rationing and control of radiation treatment of food products in the Russian Federation	55
Moseeva M.B., Azizova T.V.	
Comparative analysis of radiogenic risk of ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the cohort of workers chronically exposed to radiation	68
Gorsky G.A., Biblin A.M., Vodovatov A.V., Vishnyakova N.M.	
Nomenclature of radioprotective medical agents for major radiation accidents	81
Sharagin P.A., Tolstykh E.I., Shishkina E.A.	
The evaluation of morphometric characteristics of the pituitary gland and its adjacent tissues to elaborate a dosimetric model	91
Kaduka M.V., Bekyasheva T.A., Ivanov S.A., Stupina V.V.	
Issues of the ensuring of radiation control testing laboratories correspondence to accreditation criteria	101
Kuzmin S.V., Esaulova O.V., Moshchenskaya N.V., Rusakov V.N., Gorina I.E.	
“Radurizatsiya” software and hardware complex and “The Good Practices” Certification Scheme as the basis of the Rospotrebnadzor monitoring and traceability system in the field of radiation biotechnologies	110
Sokolova A.B.	
Key aspects of decorporation of plutonium and americium in cases of emergency intake by personnel of radiation hazardous production facilities	119

СОДЕРЖАНИЕ

Том 18 № 4, 2025

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Сивенков А.Г.,
Цовьянин А.Г., ЖуравлеваВ.Г., Кувшинников С.И.,
Тутельян О.Е.

Техногенное производственное облучение персонала
радиационных объектов в 2024 году 121

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 132

Седнев К.А., Косарлукова Е.А., Библин А.М.

Анализ данных о мирных ядерных взрывах
в радиационно-гигиенических паспортах
субъектов Российской Федерации 141

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Барковский А.Н., Буланова С.А., Огородников С.А.

Радиационный контроль при эксплуатации
медицинских ускорителей электронов
с использованием дозиметра ДКС-АТ1123 147

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Ахматдинов Руслан Р., Библин А.М., Ахматдинов Рустам Р.,
Вишнякова Н.М.

О переработке программного обеспечения
Единой системы контроля и учета индивидуальных доз
облучения граждан и радиационно-гигиенической
паспортизации 157

ДИСКУССИИ

Большов Л.А., Линге И.И., Панченко С.В.

80 лет атомной промышленности и роль
радиационной гигиены 162

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 171

CONTENTS

Vol. 18 № 4, 2025

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

Barkovsky A.N., Akhmatdinov R.R., Sivenkov A.G.,
Tsovyanyan A.G., Zhuravleva V.E., Kuvshinnikov S.I.,
Tutelyan O.E.

Technogenic industrial exposure of personnel
of radiation facilities in 2024 130

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

Assessment of the system of ensurance
of public radiation safety in the Russian Federation
related to exposure to natural sources
of ionizing radiation 139

Sednev K.A., Kosarlukova E.A., Biblin A.M.

Analysis of data on peaceful nuclear explosions
in radiation-hygienic passports of the subjects
of the Russian Federation 145

RADIATION MEASUREMENTS

Barkovsky A.N., Bulanova S.A., Ogorodnikov S.A.

The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter
for radiation monitoring of medical electron
accelerators with an energy of more than 10 MeV 155

BRIEF REPORTS

Akhmatdinov Ruslan R., Biblin A.M., Akhmatdinov Rustam R.,
Vishnyakova N.M.

Software redesign for the Unified system
of individual dose control of the citizens
and radiation-hygiene passportization 160

DISCUSSIONS

Bolshov L.A., Linge I.I., Panchenko S.V.

80 years of nuclear industry and the role
of radiation hygiene 169

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 171

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-7-18

УДК: 614.876:546.36:621.039.586(470.333)

Содержание ^{137}Cs в организме жителей населенных пунктов Брянской области по результатам радиационно-гигиенических обследований

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

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

Измерения содержания ^{137}Cs в организме жителей территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, на счетчике (спектрометре) излучения человека дают наиболее точную оценку в определении уровней радиационного воздействия на население. Целью данного исследования являлся анализ уровней содержания ^{137}Cs в организме жителей населенных пунктов Брянской области, расположенных в границах чернобыльского следа, по результатам таких измерений. Материалы и методы: В период 2019-2022 гг. проведены измерения содержания ^{137}Cs в теле более 10 тысяч жителей юго-западных территорий Брянской области. Результаты исследования и обсуждение: Наиболее высокие уровни ^{137}Cs выявлены у жителей, в чьем рационе питания включены такие продукты природного происхождения, как мясо диких животных и лесные грибы. Показано, что средние уровни содержания ^{137}Cs в организме жителей малых населенных пунктов (с численностью населения до 100 человек) выше, чем у жителей более крупных населенных пунктов. Заключение: Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о необходимости выделения населенных пунктов с численностью жителей менее 100 человек в отдельную категорию. Анализ характеристик распределений нормированных величин удельной активности ^{137}Cs в теле детей дошкольного возраста, не посещающих детские учреждения, подтвердил оправданность обосновления этой категории детского населения в дозиметрических моделях.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, население, внутреннее облучение, цезий-137, СИЧ-измерения.

Введение

Дозиметрические модели оценки доз внутреннего облучения населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), в системе радиационной защиты населения Российской Федерации базируются на двух основных подходах: по поступлению радионуклидов в организм жителей с пищевыми продуктами и по содержанию ^{137}Cs в организме человека¹. Для оценки поступления радионуклидов в организм жителей радиоактивно загрязненных территорий исследуются рационы питания населения местными пищевыми продуктами и определяется содержание радионуклидов в таких пищевых продуктах. Для оценки содержания ^{137}Cs в организме жителей используется метод измерения человека на счетчике (спектрометре) излучений.

Измерения содержания изотопов цезия в организме жителей территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС, на счетчике (спектрометре) излучения человека (СИЧ) начали с первого года после аварии [1-4]. Использование этого метода дает наиболее точную оценку в определении уровней радиационного воздействия на население, поскольку исключает как недооценку поступления радионуклида в организм жителей, так и его переоценку [5]. Поэтому, наряду с исследованиями параметров алиментарного пути поступления радионуклидов, в программу мониторинга доз облучения населения территорий чернобыльского следа в отдаленный период после аварии включены прямые измерения ^{137}Cs в теле жителей². Такие измерения были проведены в 2019-2022 гг. в населенных пунктах (НП) юго-западных территорий Брянской области [6].

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

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

Братилова Анжелика Анатольевна

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

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

Данная публикация является продолжением цикла статей³, посвященных результатам работы 2019–2022 гг. по изучению современной радиационной обстановки на приграничных с Республикой Беларусь территориях Брянской области, и представляет результаты измерений содержания ¹³⁷Cs в теле жителей обследованных НП.

Цель исследования – по результатам СИЧ-измерений провести анализ современных уровней содержания ¹³⁷Cs в организме жителей НП Брянской области, расположенных в границах чернобыльского следа.

Материалы и методы

Измерения содержания ¹³⁷Cs в организме жителей радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС выполнены в рамках радиационно-гигиенических обследований НП радиоактивно загрязненных территорий Брянской области в период 2019–2022 гг. [6]. Методы проведения радиационно-гигиенических обследований территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС, изложены в соответствующих методических документах^{2,4,5,6} Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).

Содержание ¹³⁷Cs в организме жителей было определено путем измерений содержания данного радионуклида в теле человека с использованием гамма-спектрометра (СИЧ-измерения) использовался портативный спектрометр-радиометр гамма-излучения digiDART (ORTEC, США) с детектором NaI(Tl) 75 × 75 мм. Измерения проводили в положении обследуемого человека «сидя»² с детектором у нижней части живота. Время измерения фона составляло 300 с, время измерения человека – 100 с. Условия проведения измерений соответствовали экспедиционным: измерения проводили в обследуемом НП; место измерения располагалось в наиболее подходящем для размещения спектрометрического оборудования и организации измерений здании. СИЧ-измерения были организованы в летний и осенний периоды года.

Следует отметить, что к преимуществам использования портативного спектрометра относится возможность проведения СИЧ-измерений жителей, ранее не проходивших по разным причинам (социальным, возрастным и прочим) этот вид обследования. Охват СИЧ-измерениями таких представителей населения позволяет получить более полную информацию об уровнях содержания ¹³⁷Cs в организме жителей НП. К недостаткам использования портативных СИЧ относится: отсутствие защиты детектора от внешнего гамма-излучения; значительно варьирующий коэффициент экранирования в зависимости от плотности загрязнения местности гамма-

излучающими радионуклидами, пространственного распределения фонового излучения, массы и пропорций измеряемого человека, условий проведения измерения².

Исследование результатов СИЧ-измерений проводилось для пяти групп населения^{4,5}: взрослые жители (в возрасте от 18 лет и старше), дети в возрасте от 15 до 17 лет включительно («подростки»), дети в возрасте от 7 до 14 лет включительно («школьники»), дети в возрасте от 1 до 6 лет включительно («дошкольники»), посещающие и не посещающие детские дошкольные учреждения..

В период 2019–2022 гг. были проведены измерения свыше 10 тыс. жителей приграничных с Республикой Беларусь НП Брянской области [6] в возрасте от двух до 94 лет. Самая многочисленная группа измеренных жителей – взрослые (~ 7 тыс. чел.), а среди детей (~ 3,3 тыс. чел.) – школьники (примерно 70 % обследованного детского населения). В меньшей степени охвачены СИЧ-измерениями дети дошкольного возраста – только 6 % от общего количества измеренных жителей младше 18 лет, что можно объяснить малочисленностью этой возрастной когорты, в особенности в НП сельского типа.

В исследовании НП поделены на два типа¹: «НП типа I» – сельские НП и НП городского типа, где большинство жителей имеет личные подсобные хозяйства, и «НП типа II» – городские НП, где жители приобретают пищевые продукты, в основном, в торговой сети. Ко второй категории отнесены города Клинцы и Новозыбков, к первой – остальные НП [6].

Данные о плотности загрязнения почвы территории НП были предоставлены Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

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

Результаты и обсуждение

Современные уровни значений удельной активности (УА) ¹³⁷Cs в теле жителей трех (наиболее многочисленных) возрастных категорий из 192 НП проиллюстрированы на рисунке 1 (в различных границах радиоактивного загрязнения почвы территории НП⁷), а статистические характеристики оцененных значений⁸ для взрослых жителей НП двух типов, в качестве примера – с загрязнением почвы ¹³⁷Cs от 37 до 555 кБк/м², представлены в таблице 1.

³Опубликованы в журнале «Радиационная гигиена» [6–9].

⁴МР 2.6.1.0006-10. Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения. Методические рекомендации. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 10 с. [MR 2.6.1.0006-10. Carrying out the comprehensive expeditionary radiation-hygienic survey of the settlement to assess the exposure doses to the public. Methodical guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor; 2010. 10 p. (In Russ.)]

⁵МР 2.6.1.0007-10: Оценка доз облучения детей, проживающих на территориях, радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 27 с. [MR 2.6.1.0007-10. Assessment of exposure doses to children living in areas with radioactive contamination due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Methodical guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor; 2011. 27 p. (In Russ.)]

⁶Методические рекомендации по обеспечению радиационной безопасности «Радиационный мониторинг доз облучения населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС» // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 2. С. 72–96. [Methodical guidelines "Radiation monitoring of exposure doses to the public of the radioactive contaminated territories due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant". Radiatsionnaya Gygiene. 2008;1(2): 72–96. (In Russ.)]

⁷По данным Росгидромет о средней плотности загрязнения ¹³⁷Cs почвы территории НП по состоянию на год проведения измерений.

⁸Оценка статистических характеристик распределений исследуемых величин УА проводилась без использования методов анализа цензурированных данных.

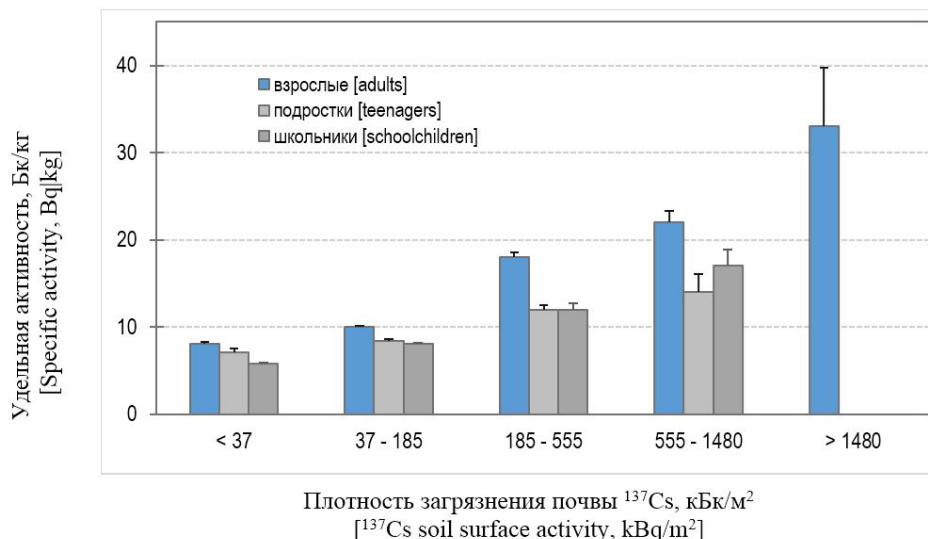


Рис. 1. Средние значения удельной активности ^{137}Cs в теле жителей НП, Бк/кг
(по уровням плотности загрязнения почвы НП)

[**Fig. 1.** Average values of specific activity of ^{137}Cs in the whole body of residents
(by the levels of ^{137}Cs soil surface activity in the settlements)]

Таблица 1

Удельная активность ^{137}Cs в организме взрослых жителей НП, Бк/кг

[*Table 1*

Specific activity of ^{137}Cs in the whole body of residents, Bq/kg]

Плотность загрязнения ^{137}Cs почвы территории НП, кБк/м ² [^{137}Cs soil surface activity, kBq/m ²]	N	Статистические параметры [Statistical parameters]*				
		Среднее ± Ст.ош. [Mean ± St.Err.]	Медиана [Median]	Геом. средн. [GM]	КВ [CV]	Мин. - Макс. [Min. - Max.]
НП типа I [Settlements "Type I"]						
37 – 185	2550	10 ± 0,19	7,7	8,8	0,9	4 – 250
185 – 555	2144	19 ± 0,71	12	13	1,8	4 – 870
НП типа II [Settlements "Type II"]						
37 – 185	1135	9,3 ± 0,17	7,4	8,3	0,6	5 – 76
185 – 555	660	14 ± 0,7	8,7	11	1,3	4 – 290

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

Результирующая погрешность индивидуальных измерений² в среднем для всего массива полученных результатов составила 40 % (диапазон: 18–80 %), т.е. для части измерений неопределенность при доверительной вероятности 95 % можно признать существенной. Наиболее высокие значения результирующей погрешности характерны для значений измеренной активности, близких к минимально детектируемой активности (МДА). Минимально детектируемый уровень обнаружения активности над уровнем флюктуаций фона с доверительной вероятностью 95 % также существенно различался и в среднем составил 460 Бк. Разброс значений МДА связан с особенностями использования портативных спектрометров в качестве СИЧ и спецификой проведения измерений в экспедиционных условиях. Доля СИЧ-измерений, не превышающих МДА, составила 42 %, из них 70 % измерений были проведены жителям НП, где плотность загрязнения почвы ^{137}Cs

не превышала 185 Бк/м², т.е. жителям территорий с относительно невысоким загрязнением. Такие данные (ниже МДА) из общего массива результатов СИЧ-измерений не исключались, поскольку наряду с детектируемыми уровнями содержания ^{137}Cs в теле человека характеризуют современную радиационную обстановку на исследуемых территориях.

Для представителей населения, у которых измеренная активность радионуклида в теле была ниже уровня детектирования, УА оценивалась по значению МДА. Существенное влияние на статистические характеристики распределений величин таким образом оцененных УА могли оказать при обработке результатов, полученных, как было сказано выше, для жителей территорий с относительно невысоким загрязнением окружающей среды (так, к примеру: доля взрослых жителей НП, где плотность загрязнения ^{137}Cs почвы не превышала 185 Бк/м², у которых измеренная активность была ниже

МДА, в среднем составила 42%; доля взрослых жителей НП, где плотность загрязнения ^{137}Cs почвы фиксировалась в диапазоне от 555 до 1480 $\text{Бк}/\text{м}^2$, – 16%). Однако следует отметить, что значения УА, оцененные по МДА, в большей части были невысоки: на территориях с загрязнением до 185 $\text{Бк}/\text{м}^2$ для возрастной категории «школьники» в среднем не превышали 6,9 $\text{Бк}/\text{кг}$; от 185 до 555 $\text{Бк}/\text{м}^2$ – 8,3 $\text{Бк}/\text{кг}$, от 555 до 1480 $\text{Бк}/\text{м}^2$ – 9,1 $\text{Бк}/\text{кг}$; для взрослых жителей этих территорий и подростков – от 6,2 до 7,4 $\text{Бк}/\text{кг}$. Только для взрослых жителей НП с загрязнением территории свыше 1480 $\text{Бк}/\text{м}^2$ оцененные по МДА значения УА составили 16 $\text{Бк}/\text{кг}$; однако 80% результатов УА для жителей такого типа территорий были выше указанного значения.

Полученные оценки УА (см. табл. 1) можно сопоставить со значением УА, при котором годовая доза внутреннего облучения жителя, обусловленная присутствием в окружающей среде ^{137}Cs , составила бы половину⁹ величины предела дозы техногенного облучения для населения, равного 1 мЗв¹⁰. Это

значение соответствует 217 $\text{Бк}/\text{кг}$. Как следует из приведенной в таблице 1 информации, среди жителей обследованных НП имеются представители населения, для которых средняя годовая доза техногенного облучения может превысить установленный санитарными правилами предел.

Из анализа распределений значений УА ^{137}Cs в теле измеренных жителей НП следует, что среди населения есть представители, для которых содержание ^{137}Cs в организме существенно выше – кратность превышения максимальных значений над средними по НП среди взрослых жителей достигает почти 30 раз, среди детей – 10 раз. Рисунок 2, на котором представлены диаграммы размаха значений УА ^{137}Cs в теле жителей (по уровням плотности загрязнения почвы НП) с указанием медианы, нижнего и верхнего квартилей, в отношении двух возрастных групп – взрослого и детского населения в возрасте от 7 до 14 лет (школьники) – также наглядно демонстрирует присутствие нетипичных (аномальных) значений.

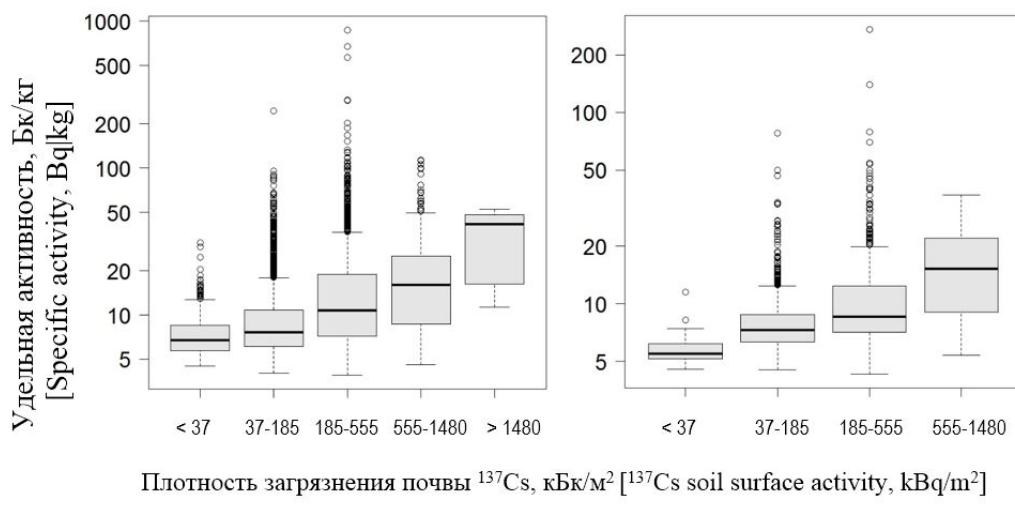


Рис. 2. Распределение значений удельной активности ^{137}Cs в организме жителей (по уровням плотности загрязнения почвы НП)

[**Fig. 2.** Specific activity of ^{137}Cs in the whole body of residents (by levels of ^{137}Cs soil surface activity in the settlements)]

Максимальные значения содержания ^{137}Cs в организме взрослых жителей (около 900 $\text{Бк}/\text{кг}$) и школьников (около 300 $\text{Бк}/\text{кг}$) были измерены в 2020 году в НП Злынковского района. Наиболее высокие значения УА ^{137}Cs в теле жителей подросткового возраста не превысили 100 $\text{Бк}/\text{кг}$ (п. Климово Климовского района, где плотность радиоактивного загрязнения почвы территории (σ^{137}) на год измерения была чуть ниже 185 $\text{kБк}/\text{м}^2$), детей дошкольного возраста – 69 $\text{Бк}/\text{кг}$ (НП Клинцовского и Гордеевского районов, где $185 < \sigma^{137} < 555 \text{ kБк}/\text{м}^2$).

В 2022 году во время проведения СИЧ-измерений был проведен опрос измеренных жителей о потреблении ими пищевых продуктов природного происхождения – лесных грибов и ягод, а также прочих продуктов (в т.ч. дичи, рыбы местных водоемов). Сопоставление усредненных величин стандартизованных значений УА ^{137}Cs (стандартизация проведена по среднему значению для возрастной группы жителей в НП) для опрошенных жителей (2213 чел.) с различными предпочтениями в потреблении природных пищевых продуктов, продемонстрированное на рисунке 3, подтверждает

⁹Годовая доза техногенного облучения определяется как сумма дозы внешнего облучения и дозы внутреннего облучения. Здесь сделано предположение, что доза внешнего и доза внутреннего облучения сопоставимы.

¹⁰Нормы 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.)]

факт влияния фактора потребления природных продуктов на уровни содержания ^{137}Cs в организме жителей [7], а различные средние значения стандартизованной УА ^{137}Cs в организме жителей, включающих в свой рацион пит器ия природные продукты, указывают на различную степень такого

влияния. Различные же доверительные интервалы оцененных средних значений (на рис. 3 обозначены линиями) демонстрируют, хотя и косвенном образом, разную степень разброса содержания ^{137}Cs и в самих природных пищевых продуктах [9].

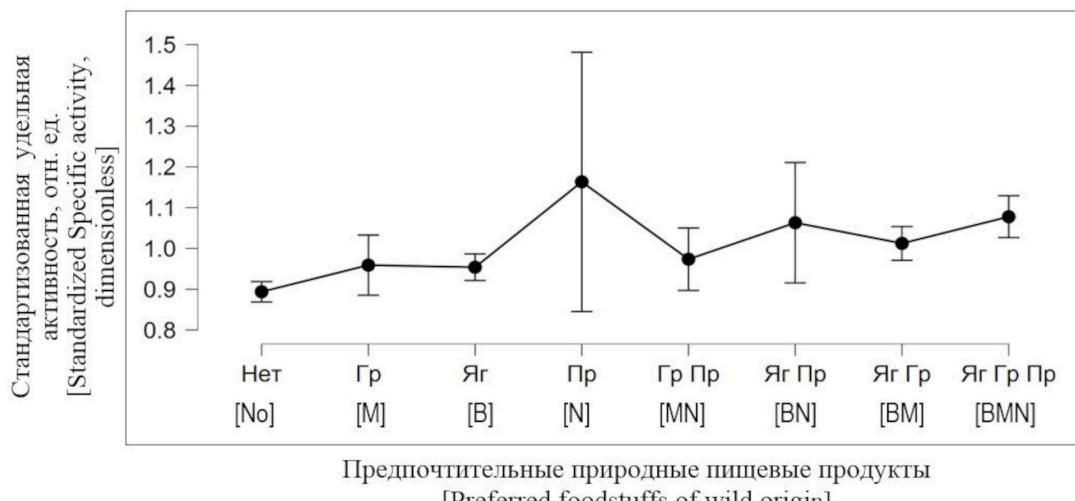


Рис. 3. Доверительные интервалы ($P=0,95$) средних значений стандартизированной удельной активности ^{137}Cs в теле жителей. Обозначения: Нет – без употребления, Гр – грибы, Яг – ягоды, Пр - прочие природные продукты)

[**Fig. 3.** Confidence intervals ($P=0.95$) for the mean values of standardized specific activity of ^{137}Cs in the whole body of residents. The symbols: No – no consumption, M – mushrooms, B – forest berries, N – other natural (wild origin) foodstuffs]

Большой массив полученных в исследовании данных позволил выявить характеристики величин, стандартизованных для НП с различным радиоактивным загрязнением. Нормированные на среднюю плотность загрязнения почвы территории НП значения УА ^{137}Cs в теле жителей, оцененные по результатам исследований 2019-2022 гг. для территорий, где плотность загрязнения почвы ^{137}Cs была выше 37 кБк/м², представлены в таблице 2 (с исключением аномальных значений согласно критерию «интервала доверия» [10] применительно к распределению логарифмированных величин). Поскольку проведение СИЧ-измерений осуществляли в разные месяцы календарного года, перед процедурой стандартизации значения УА ^{137}Cs были унифицированы с учетом сезонного коэффициента⁶. Следует принимать во внимание, что в таблице 2 приведены обобщенные значения нормированных величин без разделения НП по преобладающим группам типов почв, что, возможно, следует учитывать при построении прогностических дозовых моделей. Однако с использованием данных таблицы 2 можно получить ориентировочные оценки УА ^{137}Cs в теле жителей, перемножив соответствующее значение нормированной величины на плотность загрязнения радионуклидом почвы территории НП, выраженную в кБк/м².

Изучение характеристик распределений¹¹ значений УА в отношении жителей НП с различной численностью населения (в пределах территории с одним уровнем радиоактивного загрязнения) показало отличие характера распределения исследуемой величины для взрослого населения малых НП (с численностью до 100 чел., далее – «НП типа I^m»), что подтверждалось при статистическом анализе распределений нормированных на плотность загрязнения почвы территории значений УА ^{137}Cs в теле взрослых жителей (тест Краскела-Уоллиса ($p < 0,01$) с апостериорным тестом межгрупповых различий с использованием критерия Данна (коррекция Холма) ($p < 0,01$)) (рис. 4а). Статистически значимое различие также подтверждалось при анализе характеристик распределений этих величин для групп подростков и школьников (рис. 4б). С точки зрения моделирования дозовых оценок внутреннего облучения жителей это означает, что, возможно, следует рассмотреть параметры модели внутреннего облучения жителей для такого типа НП (малого НП с численностью менее 100 чел.) в отдельности; в особенности, если учесть, что в настоящее время доля таких НП составляет 60 % от всех НП, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС¹² [11].

¹¹Здесь и далее – предварительный тест принадлежности выборок к нормальному распределению проведен с использованием критерия Шапиро–Уилка. Тест на гомогенность дисперсий проведен с использованием критерия Левена, если не оговорено иное [Here and below, the preliminary test for normal distribution of the samples was conducted using the Shapiro-Wilk test. The test for homogeneity of variances was conducted using the Levene test, unless otherwise stated].

¹²Постановление Правительства РФ от 08.10.2015 № 1074 «Об утверждении перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС». [Governmental decree of Russian Federation №1074 from 08.10.2015 «On approval of the list of locations within the contaminated zone boundaries due to the Chernobyl NPP accident». (In Russ.)]

Таблица 2

**Нормированная удельная активность ^{137}Cs в организме жителей обследованных НП, $10^{-3} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$
(нормирование по среднему значению плотности загрязнения ^{137}Cs почвы территории НП)**

[Table 2]

**Normalized specific activity of ^{137}Cs in the whole body of the residents of surveyed settlements, $10^{-3} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$
(normalized to the average value of ^{137}Cs soil surface activity in the settlements))**

Возрастная группа [Age group]	N	Статистические параметры [Statistical parameters]*					
		Среднее [Mean]	Ст. откл. средн. [SD]	Геом. средн. [GM]	Ст. откл. геом. средн. [GSD]	K95 [Q95]	Мин. - Макс. [Min. - Max.]
НП типа I [Settlements "Type I"]							
взрослые [adults]	3149	0,091	0,091	0,064	2,3	0,26	0,01 – 1,10
подростки [teenagers]	246	0,060	0,056	0,046	2	0,16	0,01 – 0,49
школьники [schoolch.]	671	0,064	0,053	0,052	1,9	0,14	0,01 – 0,74
НП типа II [Settlements "Type II"]							
взрослые [adults]	1093	0,064	0,047	0,053	1,9	0,15	0,01 – 0,63
подростки [teenagers]	322	0,050	0,034	0,043	1,7	0,11	0,01 – 0,31
школьники [schoolch.]	96	0,054	0,03	0,049	1,5	0,09	0,03 – 0,28

* Здесь и далее используются следующие обозначения статистических параметров: Ст. откл. средн. – стандартное отклонение от арифметического среднего значения; Ст. откл. геом. средн. – стандартное отклонение от геометрического среднего значения; K95 – 95-й percentile (95% квантиль). [The names and symbols of quantities are hereafter called as: SD – the standard deviation from the arithmetical mean value; GSD – the standard deviation from the geometric mean value; Q95 – 95th percentile (95% quantile)].

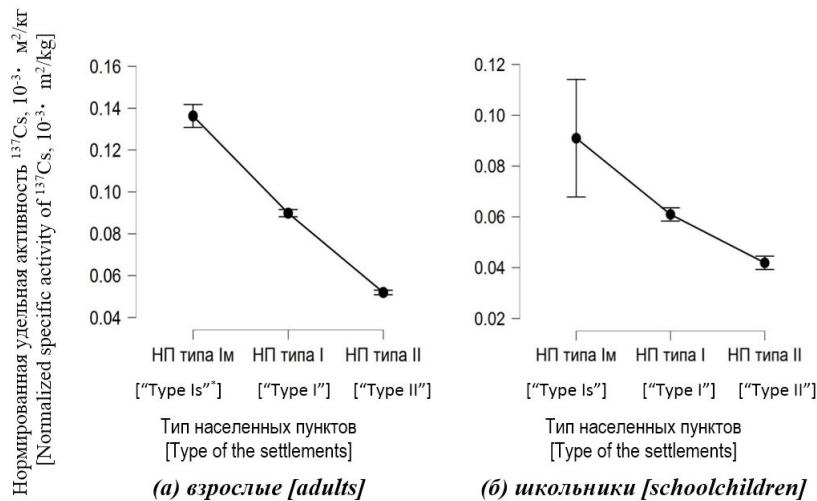


Рис. 4. Доверительные интервалы ($P=0,95$) средних значений нормированной удельной активности ^{137}Cs в организме жителей НП (нормирование по среднему значению плотности загрязнения ^{137}Cs почвы территории НП)
[Fig. 4. Confidence intervals ($P=0,95$) for the mean values of normalized specific activity of ^{137}Cs in the whole body of inhabitant (normalized to the average value of soil contamination density with the ^{137}Cs)]

Сравнительный анализ нормированных величин УА ^{137}Cs для разных возрастных групп жителей, дополнительно стратифицированных по полу, также показал, что обособление малых НП оправданно. По результатам такого анализа нормированные величины УА ^{137}Cs в теле жителей в возрасте старше 7 лет как мужского, так и женского пола трех типов НП (включая НП малые) значимо различаются ($p<0,01$; кри-

терий Данна (коррекция Холма)). Различие между представителями мужского и женского пола взрослых жителей в каждом типе НП также статистически значимо ($p<0,05$; t -критерий Стьюдента [12]). Принимая во внимание изложенные здесь доводы, был выполнен расчет нормированных величин для трех типов НП (табл. 3). Помимо результатов расчетов по гендерному признаку, в таблице 3 также

представлены (как расширение табл. 2) оцененные значения для обоих полов для малых НП и для прочих НП первого типа. Сопоставление данных таблицы 2 и таблицы 3 позволяет заключить, что нормированные величины для взрослых жителей малых НП (табл. 3), в среднем, почти в полтора раза

выше, чем для НП сельского типа в целом, т.е. НП типа I (табл. 2). Из чего можно сделать вывод, что выделение малых НП в отдельную категорию повысит точность оценки доз внутреннего облучения.

Таблица 3

Нормированная удельная активность ^{137}Cs в организме жителей обследованных НП (с разделением по полу и возрасту), $10^{-3} \cdot \text{м}^2/\text{kg}$
(нормирование по среднему значению плотности загрязнения ^{137}Cs почвы территории НП)

Table 3

Normalized specific activity of ^{137}Cs in the whole body of the inhabitants (with age and gender specifics), $10^{-3} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$
(normalized to the average value of ^{137}Cs soil surface activity in the settlement)]

Возрастная группа [Age group]	Пол	N	Статистические параметры [Statistical parameters]				
			Среднее [Mean]	Ст. откл. средн. [SD]	Геом. средн. [GM]	Ст. откл. геом. средн. [GSD]	K95 [Q95]
НП типа Iм [Settlements "Type I _m "] *							
взрослые [adults]	м	126	0,16	0,13	0,12	2,2	0,43
	ж	166	0,14	0,12	0,10	2,3	0,41
	оба пола	292	0,15	0,12	0,11	2,2	0,42
НП типа I [Settlements "Type I"] **							
взрослые [adults]	м	1058	0,099	0,096	0,071	2,3	0,27
	ж	1799	0,078	0,076	0,056	2,3	0,21
	оба пола	2857	0,086	0,085	0,061	2,3	0,23
подростки [teenagers]	м	143	0,061	0,066	0,044	2,1	0,17
	ж	99	0,056	0,037	0,046	1,8	0,15
	оба пола	242	0,059	0,056	0,045	2	0,16
школьники [schoolch.]	м	370	0,061	0,041	0,051	1,8	0,14
	ж	275	0,064	0,060	0,050	2	0,14
	оба пола	645	0,062	0,050	0,051	1,9	0,14
НП типа II [settlements "Type II"]							
взрослые [adults]	м	483	0,069	0,055	0,056	1,9	0,15
	ж	610	0,061	0,039	0,051	1,8	0,14
подростки [teenagers]	м	198	0,050	0,035	0,043	1,7	0,11
	ж	124	0,049	0,032	0,042	1,7	0,10
школьники [schoolch.]	м	52	0,051	0,017	0,048	1,4	0,08
	ж	44	0,058	0,041	0,051	1,6	0,12

* НП типа Iм – населенные пункты с численностью жителей до 100 чел. [Settlements "Type I_m" – the settlements where population is less than 100 people].

** НП типа I – прочие населенные пункты категории «НП типа I» [Settlements "Type I" – other settlements of the category "Type I"].

Информация в таблицах 2 и 3 также дает представление о внутригрупповой неоднородности распределений исследуемых величин – коэффициенты вариации находятся в диапазоне от 0,3 до 1 и большая их часть близка к 0,9, что указывает как на большую вариабельность пищевых предпочтений, так и на большую вариативность уровней загрязнения пищевых продуктов, употребляемых населением в пищу. Такая же ситуация часто наблюдается и при исследовании распределений УА ^{137}Cs , в т.ч. трансформированных (логарифмированных), для жителей одной возрастной категории одного НП. Из чего можно за-

ключить, что детальное изучение характеристик распределений исследуемых величин остается актуальной задачей и на современном этапе радиационной аварии.

Стандартизация исследуемых величин позволила также более детально изучить вопрос возможного различия уровней содержания ^{137}Cs в организме жителей дошкольного возраста. Рисунок 5 демонстрирует, что по результатам проведенных СИЧ-измерений средние уровни содержания ^{137}Cs в теле детей дошкольного возраста, не посещающих дошкольные учреждения, выше средних уровней для детей, которые дошкольные учреждения посещают.

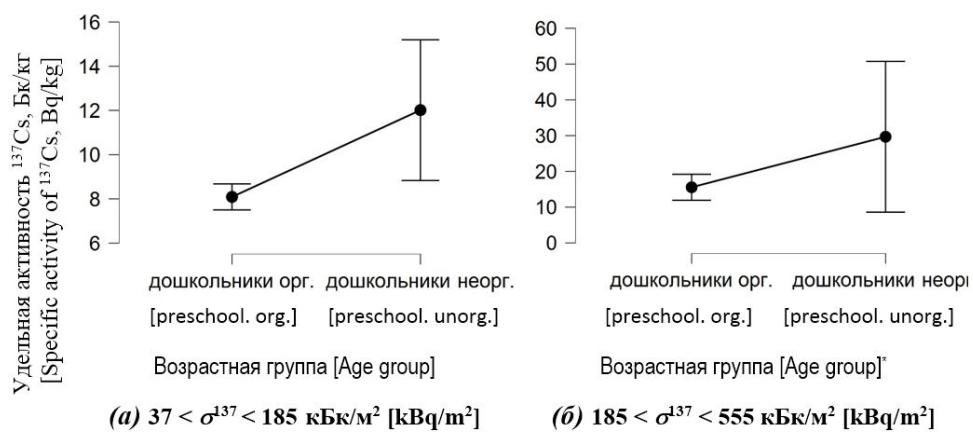


Рис. 5. Доверительные интервалы ($P=0.95$) средних значений удельной активности ^{137}Cs в организме жителей НП дошкольного возраста

[Fig. 5. Confidence intervals ($P=0.95$) for the mean values of specific activity of ^{137}Cs in the whole body of preschoolers]

Как представлено выше, численность таких жителей (дошкольников) в данном исследовании довольно мала и выполнить сравнительный анализ этих групп населения в пределах одного НП практически невозможно. Однако сравнение представляется возможным, если провести анализ распределений стандартизованных величин. С этой целью значения УА ^{137}Cs в теле жителей младшего возраста были нормированы на среднее значение величины, оцененное для возрастной группы в пределах одного НП, а также нормированы на плотность загрязнения ^{137}Cs почвы территории НП. Изучение характеристик распределений величин, нормированных на внутригрупповое среднее значение, позволило сделать вывод о неоднородности их дисперсий ($p < 0.05$; критерий Муда); при этом распределение величин для группы неорганизованных дошкольников характеризуется большим разбросом значений. Анализ характеристик распределений величин, нормированных на плотность загрязнения почвы, также показал, что распределения величин для двух групп детей различны ($p < 0.05$; критерий Манна-Уитни). Средние значения УА ^{137}Cs , нормированной на плотность σ^{137} , оцененные для неорганизованных дошкольников, выше (в 1,7 раза), чем для организованных дошкольников. С некоторой степенью допущений полученный в этом анализе результат согласуется с результатом анализа объемов потребления местных пищевых продуктов детьми дошкольного возраста, по результатам которого было установлено, что неорганизованные дошкольники в больших объемах потребляют молоко, грибы, рыбу местных водоемов, а также дикорастущие пряные травы [7].

В данном исследовании, с целью получения более устойчивых характеристик вероятностного распределения величин содержания ^{137}Cs в организме жителей, из массива данных нормированных величин исключены экстремально высокие значения, для чего использован робастный метод фильтрации, чувствительный к асимметричному распределению [10]. Однако вопрос оправданности и корректности удаления аномально высоких значений при оценке доз внутреннего облучения критической группы населения остается дискуссионным, поскольку высокое значение поступления ^{137}Cs в организм человека может быть связано не только с большими объемами потребления, но и с высоким содержанием радионуклида в пищевом продукте. Наше ис-

следование, как и исследования с использованием результатов СИЧ-измерений других авторов [13, 14], показывает, что пищевые продукты природного происхождения остаются фактором повышенного радиационного воздействия на жителей радиоактивно загрязненных территорий. Но жизнедеятельность населения тесно связана с природными объектами окружающей среды и регулировать этот процесс – довольно сложная задача. Разъяснительная работа среди населения с изложением основных принципов радиационной гигиены (профилактических мер, способствующих снижению риска воздействия радиации на организм человека) остается одним из способов решения этой проблемы.

Заключение

В данной публикации представлены результаты измерений содержания ^{137}Cs в организме жителей радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС юго-западных районов Брянской области, выполненных в рамках радиационно-гигиенических обследований НП в 2019–2022 гг. Проведен анализ характеристик распределений величин УА радионуклида, исследованы закономерности изменения содержания ^{137}Cs в теле жителей разных возрастных категорий различных типов НП в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения территории. Результаты СИЧ-измерений показали, что среди населения есть представители, для которых содержание ^{137}Cs в организме существенно выше средних значений для НП: среди взрослых жителей – почти в 30 раз, среди детей – в 10 раз. Однако доля измеренных жителей с низким содержанием радионуклида тоже довольно велика.

По результатам изучения закономерностей изменения УА ^{137}Cs , оцененной для обследованного населения разного возраста и пола, проживающего в НП различного типа, в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения территории определены современные значения величин, характеризующих распределение отношения этой величины к плотности радиоактивного загрязнения почвы территории. Анализ нормированных на плотность загрязнения почвы территории величин УА ^{137}Cs в теле взрослых жителей НП, где численность населения не превышает 100 человек, позволил сделать вывод о необходимости выделения в до-

зиметрической модели НП данного типа в отдельную категорию.

Анализ характеристик распределений нормированных величин УА ^{137}Cs в теле детей дошкольного возраста подтвердил оправданность выделения детей дошкольного возраста, не посещающих детские учреждения, в отдельную категорию, поскольку для них оцененные уровни поступления радионуклида в организм выше, чем для детей того же возраста, но посещающих детские учреждения. Однако с целью уточнения численных значений дозиметрических параметров для этой категории населения исследование необходимо продолжить.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

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

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

Брук Г.Я. – разработка концепции, определение цели и формулирование задач исследования, дизайн проекта, координация работы участников проекта.

Жеско Т.В. – обработка первичных материалов исследования.

Кадука М.В. – обработка первичных материалов исследования, поиск литературных данных.

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

Благодарности

Авторы выражают благодарность и признательность за содействие в работе В.А. Яковлеву, А.В. Громову, К.А. Сапрыкину, В.А. Некрасову, С.А. Иванову (специалисты Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева в период проведения исследований), а также А.В. Кудряшову (главный врач филиала ФБУЗ ЦГиЭ в городе Клинцы Брянской области), В.А. Лалаяну (заместитель главного врача по санитарно-эпидемиологическим вопросам филиала ФБУЗ ЦГиЭ в городе Клинцы Брянской области), А.А. Ладику (эксперту-физику по контролю за источниками ионизирующих и неионизирующих излучений филиала ФБУЗ ЦГиЭ в городе Клинцы Брянской области). Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания и рекомендации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование выполнено в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Научное сопровождение работ по реализации Концепции перехода населения территорий Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие радиационных аварий и катастроф, от состояния проживания в условиях радиационной аварии к условиям нормальной жизнедеятельности населения».

Литература

1. Российский национальный доклад: 35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986-2016 / Под общ. ред. Л.А. Большова. М., 2021. 104 с.
2. Константинов Ю.О. Чернобыльская авария: обоснование и реализация решений по защите населения // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 2. С. 59–67.
3. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Барковский А.Н. и др. Облучение населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС и основные направления дальнейшей работы на предстоящий период // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 72–77.
4. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2019. № 2(22). С. 17–23.
5. Рожко А.В., Власов О.К., Чунихин Л.А. и др. СИЧ-ориентированный метод оценки годовых доз внутреннего облучения населения в отдаленный период чернобыльской аварии // Радиация и риск. 2009. Т. 18, № 2. С. 48–60.
6. Романович И.К., Базюкин А.Б., Барковский А.Н. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 1: Характеристика населенных пунктов: // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 22–36.
7. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 2: Структура рационов питания населения: // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 7–21.
8. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 3: Содержание радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 7–17.
9. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Содержание ^{137}Cs в пищевых продуктах природного происхождения по результатам современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 7–17.
10. Hubert M., Vandervieren E. An adjusted boxplot for skewed distributions // Computational Statistics & Data Analysis. 2008. Vol. 52, No 12. P. 5186–5201.
11. Населенные пункты России: численность населения и географические координаты. URL: <https://www.data-in.ru/catalog/datasets/160/> (Дата обращения: 30.09.2025).
12. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению. Препринт расширенного издания. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018.
13. Цыгунцев П.Н., Цуранков Э.Н. Влияние информированности сельского населения на формирование доз внутреннего облучения // Радиоэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 383–387.
14. Агеева Т.Н., Мерзлова О.А. О дозах облучения населения Могилевской области в зонах радиоактивного загрязнения // Радиоэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 166–168.

Поступила: 11.08.2025

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

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

Братилова Анжелика Анатольевна – заведующий лабораторией внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: bratilova@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6489-3974

Брук Геннадий Яковлевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-9558-7558

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

Кадука Марина Валерьевна – кандидат биологических наук, заведующий радиохимической лабораторией Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0009-0009-6970-4536

Кравцова Ольга Сергеевна – кандидат биологических наук, исполняющая обязанности ведущего научного сотрудника лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0009-0008-5543-5411

Для цитирования: Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я., Жеско Т.В., Кадука М.В., Кравцова О.С. Содержание ^{137}Cs в организме жителей населенных пунктов Брянской области по результатам радиационно-гигиенических обследований // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 7–18. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-7-18

The current levels of ^{137}Cs in the body of residents of populated areas of the Bryansk region according to the results of radiation and hygienic survey

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

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

Measurements of the ^{137}Cs content in the bodies of residents of the territories radioactively contaminated due to the Chernobyl accident using a whole body counter (spectrometer) provide the most accurate assessment in determining the levels of radiation exposure to the population. The object of this study was analysis of

Anzhelika A. Bratilova

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

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

results of ^{137}Cs measurements with a whole body counter. Materials and methods: In 2019–2022 measurements of the ^{137}Cs content in the bodies of more than 10 thousand residents of the southwestern territories of the Bryansk region were carried out. Research results and discussion: The results of measurements of the ^{137}Cs content in the bodies of residents of the surveyed settlements are presented. The highest levels of ^{137}Cs were measured in residents whose diet included such natural products as wild meat and wild mushrooms. It is shown that the average levels of ^{137}Cs in the bodies of residents of small settlements (up to 100 residents) are higher than that for residents of other settlements. Conclusion: Analysis of the obtained results allowed us to conclude that it is necessary to separate settlements with a population of less than 100 people into a specific category. Analysis of the distribution characteristics of the normalized values of specific activity of ^{137}Cs in the body of preschool children who do not attend child care institutions confirmed the justification for separating this category in dosimetric models.

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

Authors' personal contribution

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

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

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

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

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

Kaduka M.V. – processing and systematization of primary research materials, literature search.

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

Acknowledgements

The authors express their gratitude and appreciation for assistance in the work to V.A. Yakovlev, A.V. Gromov, K.A. Saprykin, V.A. Nekrasov, S.A. Ivanov (who were employees of the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. P.V. Ramzaev during the period of the study), as well as to A.V. Kudryashov (Chief Doctor of the Branch of FBUZ CHE in Klintsy, Bryansk region), V.A. Lalayan (Deputy Chief Doctor for Sanitary and Epidemiological Issues of the Branch of FBUZ CHE in Klintsy, Bryansk region), A.A. Ladik (Expert-Physicist for Control of Ionizing and Non-ionizing Radiation Sources of the Branch of FBUZ CHE in Klintsy, Bryansk region). The authors are grateful to the reviewers for their constructive comments and recommendations.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Sources of funding

The study was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025: "Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia" on the topic: "Scientific support for work on the implementation of the Concept for the transition of the population of territories

of the Russian Federation subjected to radioactive contamination due to radiation accidents and disasters, from the state of living in conditions of a radiation accident to conditions of normal life of the population".

References

1. Russian national report: 35 years of the Chernobyl accident. Results and prospects of overcoming its consequences in Russia. 1986–2016. Under the general editorship of LA Bolshov. Moscow; 2021. 104 p. (In Russian).
2. Konstantinov YuO. Chernobyl accident: rationale and realization of decisions on protection of the population. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2011;4(2): 59-67. (In Russian).
3. Bruk GYa, Bazyukin AB, Barkovsky AN., Bratilova AA, Vlasov AYu, Goncharova YuN, et al. Exposure of the population of the Russian Federation due to the accident at the Chernobyl NPP and the main directions of further work in the coming period. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 72-77. (In Russian).
4. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. Peculiarities of internal exposure doses forming and their prognosis for the population of Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeystviennosti = Medico-biological problems of life activity*. 2019;2(22): 17-23 (In Russian).
5. Rozhko AV, Vlasov OK, Chunikhin LA, Drozdov DN. WBC-related method for annual internal dose assessment at long time after Chernobyl accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2009;18(2): 48-60. (In Russian).
6. Romanovich IK, Bazyukin AB, Barkovsky AN., Biblin AM, Bratilova AA, Bruk GYa, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 1: Characteristics of the settlements. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 22-36. (In Russian). DOI:10.21514/1998-426x-2023-16-3-22-36.
7. Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Varfolomeeva KV, Drozdova EA, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 2: Population's food preferences (diet). *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 7-21. (In Russian). DOI:10.21514/1998-426x-2023-16-4-7-21.
8. Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Drozdova EA, Zhesko TV, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 3: Radionuclide content in agricultural food products. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 7-17. (In Russian). DOI:10.21514/1998-426x-2023-17-2-7-17.
9. Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Zhesko TV, Kaduka MV, et al. The current levels of ^{137}Cs in foodstuffs of wild origin according to the results of the radiation-hygienic survey of the Bryansk region settlements. *Radiatsionnaya*

- Gygiena = Radiation Hygiene.* 2025;18(1): 7–17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-7-17.
10. Hubert M, Vandervieren E. An adjusted boxplot for skewed distributions. *Computational Statistics & Data Analysis.* 2008;52(12): 5186–5201.
11. Populated areas of Russia: population and geographical coordinates. Available from: <https://www.data-in.ru/catalog/datasets/160/> [Accessed 2025 Sep 30].
12. Lemeshko BYu. Criteria for testing homogeneity hypotheses. Application Guide. Preprint of the extended edition. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2018.
13. Tsygvintsev PN, Tsurankov EN. The Impact of Rural Population Awareness on the Formation of Internal Radiation Doses. *Radioecological Consequences of Radiation Accidents – on the 35th Anniversary of the Chernobyl Accident: Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference.* Obninsk: FGBNU VNIIRAE; 2021. P. 383–387.
14. Ageeva TN., Merzlova OA. On Radiation Doses of the Population of the Mogilev Region in Radioactive Contamination Zones. *Radioecological Consequences of Radiation Accidents – on the 35th Anniversary of the Chernobyl Accident: Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference.* Obninsk: FGBNU VNIIRAE; 2021. P. 166–168.

Received: August 11, 2025

Ivan K. Romanovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-0668-459X

Anatoly B. Bazyukin – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Internal Irradiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-9853-0696

For correspondence: **Angelika A. Bratilova** - Head of the Laboratory of Internal Irradiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, Russia, 197101; E-mail: bratilova@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-6489-3974

Gennady Ya. Bruk – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Internal Irradiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-9558-7558

Tatiana V. Zhesko – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Internal Irradiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0007-1678-2931

Marina V. Kaduka – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Head of the Radiochemical Laboratory of the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0009-6970-4536

Olga S. Kravtsova – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Internal Irradiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0008-5543-5411

For citation: Romanovich I.K., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Bruk G.Ya., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kravtsova O.S. The current levels of ¹³⁷Cs in the body of residents of populated areas of the Bryansk region according to the results of radiation and hygienic survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2025. Vol. 18, No. 4. P. 7–18. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-7-18

Радиомодифицирующие свойства бромзамещенного производного индол-3-карбоновой кислоты при протонной и электронной терапии карциномы Эрлиха *in vivo*

Солдатова О.В.¹, Филимонова М.В.¹, Сурикова В.И.¹, Шитова А.А.¹, Николаев К.А.¹,
Рыбачук В.А.¹, Косаченко А.О.¹, Корякин С.Н.¹, Шегай П.В.², Иванов С.А.¹, Каприн А.Д.²,
Филимонов А.С.¹

¹ Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия

² Национальный медицинский исследовательский центр радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия

Несмотря на значительный прогресс в области химиолучевой противоопухолевой терапии, внедрение новых фармакологических агентов и модификаторов радиационного ответа, направленных на увеличение терапевтического индекса лучевой терапии, остается одной из приоритетных задач экспериментальной онкологии и радиобиологии. Цель исследования – оценка противоопухолевых эффектов комбинированного применения ионизирующего излучения (электроны, протоны) и нового производного индол-3-карбоновой кислоты – 1-метил-2-бромметил-3-этоксикарбонил-5-метокси-6-броминдола. Материалы и методы: Исследования проводили на самках мышей F₁(CBA×C₅₇Bl/6j) с трансплантированной в область правой задней конечности карциномой Эрлиха. Соединение в дозе 30 мг/кг вводили внутривенно в день облучения и через 48 часов после первой инъекции. Методы работы включали токсикометрические и морфометрические исследования. Результаты исследования и обсуждение: Определена средняя летальная доза соединения при внутривенном введении мышам, LD₅₀ = 60 мг/кг. Двукратные инъекции в режиме монотерапии вызывали стабильное торможение роста опухоли, которое развивалось до 30 %. При комбинированном применении лучевого воздействия и исследуемого соединения терапевтическая эффективность существенно увеличивалась, что свидетельствует о наличии синергического взаимодействия: индекс торможения роста опухоли повышался на 19 % с однократным облучением электронами, на 32 % – с фракционированным облучением электронами и на 27 % – с однократным облучением протонами. Кроме того, экспериментальная комбинированная терапия, наряду со значительным подавлением опухолевого роста, повышала выживаемость животных-опухоленосителей, не вызывая значимых токсических эффектов. Заключение: Полученные результаты указывают на перспективность дальнейшего изучения комбинированных режимов лучевой терапии и производных индол-3-карбинола. Дальнейшие исследования механизмов взаимодействия этих соединений и ионизирующего излучения должны включать оценку влияния на основные патофизиологические механизмы развития неоплазий, ключевые пути reparации ДНК и апоптоза.

Ключевые слова: противоопухолевые соединения, производные индол-3-карбоновой кислоты, алкилирующие агенты, противоопухолевая эффективность *in vivo*, комбинированная химиолучевая терапия.

Введение

Цитостатические препараты остаются фундаментальным компонентом в химиотерапии злокачественных новообразований, в том числе в комбинации с радиотерапией [1–3]. Подобные комбинированные режимы позволяют преодолевать резистентность опухоли к монотерапии и повышают радикальность лечения за счет взаимного усиления механизмов повреждения опухолевых клеток [4–8]. Однако, несмотря на значительное разнообразие цитостатических противоопухолевых препаратов, проблема достижения длительной безрецидивной ремиссии сохраняет свою актуальность. Одним из перспективных направлений в ее решении представляется разработка новых соединений данного химического класса, об-

ладающих способностью преодолевать механизмы лекарственной устойчивости злокачественных клеток.

В лаборатории радиационной фармакологии МРНЦ им. А.Ф. Цыба (г. Обнинск, РФ) разрабатываются новые соединения, обладающие противоопухолевой активностью, способные усиливать эффекты лучевой и химиотерапии [9–10], в том числе оригинальные водорастворимые противоопухолевые иммуномодулирующие диалкиламиноалкиловые эфиры производных индол-3-карбоновой кислоты (ИЗК), оказывающие противовирусное действие и вызывающие торможение роста неоплазий различного генеза без токсического влияния на организм [11–14]. Показано, что ряд новых производных ИЗК, модифицированных алкилирующими компонентами, проявляют выраженную противоопухолевую активность в условиях *in vitro* и *in vivo* [15–16]. Полученные предва-

Солдатова Ольга Васильевна

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба

Адрес для переписки: 249036, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Королёва, д. 4; E-mail: ovsoldatova97@gmail.com

рительные экспериментальные данные позволяют рассматривать данную группу соединений в качестве перспективных кандидатов для дальнейшей разработки высокоэффективных отечественных противоопухолевых средств.

Цель исследования – оценка противоопухолевых эффектов комбинированного применения ионизирующего излучения (электроны, протоны) и оригинального производного индол-3-карбоновой кислоты – 1-метил-2-бромметил-3-этоксиарбонил-5-метокси-6-броминдола.

Задачи исследования

Изучение влияния комбинированного применения T1167 и лучевого воздействия (протоны, электроны) на динамику объема и торможения роста солидной карциномы Эрлиха мышей в условиях *in vivo*.

Материалы и методы

Лабораторные животные

Самки мышей F₁(CBA×C₅₇Bl/6j) (n = 176) и самцы мышей линии BALB/c (n = 42) для исследований были получены из Научного центра биомедицинских технологий Федерального медико-биологического агентства (Андреевка, РФ). Все экспериментальные работы с лабораторными животными выполнены в соответствии с общепринятыми нормами манипуляций с животными, на основе стандартных операционных процедур, принятых в лаборатории радиационной фармакологии, действующего руководства по доклиническим исследованиям [17].

Исследуемое соединение

Субстанция 1-метил-2-бромметил-3-этоксиарбонил-5-метокси-6-броминдола (T1167, 405,18 г/моль), наработанная и стандартизированная в лаборатории радиационной фармакологии МРНЦ им. А.Ф. Цыба, применялась в дозе 30 мг/кг (0,3 % суспензия) на основе эмульгатора Tween-80 (NeoFroxx, Германия) и воды для инъекций (Истрафарм, РФ), вводилась животным внутрибрюшинно (в/б) в объеме 0,1 мл на 10 г массы тела. T1167 синтезируется в лаборатории радиационной фармакологии в качестве промежуточного продукта с целью получения ряда противо-вирусных и противоопухолевых соединений [12–14]. Подробный способ получения соединения T1167 описан нами ранее [15].

Опухолевая модель

Клеточную суспензию мышевой карциномы Эрлиха (1,0×10⁶ клеток/мышь) в 0,1 мл среды 199 (ПанЭко, РФ) трансплантировали подкожно в область латеральной поверхности заднего правого бедра. Подсчет клеток осуществляли с помощью автоматического счетчика клеток LUNA-II (Logos Biosystems, Корея). К 7–8 суткам эксперимента у всех животных наблюдалось формирование четко детектируемых опухолевых узлов, размеры которых не выходили за границы облучаемого поля (максимальные объемы (мм³) и размеры (мм) опухолевых узлов, которые подвергались облучению протонами – 388,93 и 418,61 – 15,03 × 10,64 × 3,42 и 14,60 × 10,20 × 4,60).

Облучение

Локальное облучение опухолевых узлов солидной карциномы Эрлиха (СКЭ) проводили на ускорителе электронов «Novac-11» (Sordina IORT Technologies, Италия) и ускорителе протонов «Прометеус» (РФ), расположенных в МРНЦ им. А.Ф. Цыба (г. Обнинск). Физико-дозиметрическое обеспечение лучевых воздействий выполнено специалистами центра коллективного пользования (ЦКП) «Радиологические и клеточные технологии» ФГБУ НМИЦ радиологии Минздрава России. Дозиметрию электронного и протонного излучения проводили с использованием 3D водного фантома MP3-P (PTW Freiburg, Германия), двухканального дозиметра Tandem XDR (PTW Freiburg, Германия) и набора ионизирующих камер Farmer Chamber Type 30,013 (PTW Freiburg, Германия) и Roos Chamber Type 3400 (PTW Freiburg, Германия). При облучении электронами мышь на пластине располагали горизонтально на манипуляционном столе и позиционировали тубус ускорителя диаметром 30 мм по центру новообразования, вплотную ортогонально латеральной поверхности. Проводили однократное локальное воздействие на опухоль электронами с энергией 8 МэВ в дозе 15 Гр и фракционированное воздействие электронами с энергией 10 МэВ в суммарной дозе 24 Гр (3 фракции по 8 Гр с интервалом 24 часа). Протонный пучок модифицировали замедлителем из полиметилметакрилата, что обеспечивало равномерное воздействие на узел СКЭ протонами с энергией 78–90 МэВ на пике Брэгга (глубина пика 32 мм). Равномерность поля излучения в плоскости ортогональной оси пучка контролировали с помощью радиохромной пленки Gafchromic EBT3 (Ashland, США). Дозиметрические расчеты проводили с использованием программного обеспечения PTW MEPHYSTO (Германия) в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ TRS-398. По данным дозиметрических измерений и расчетов, неравномерность поглощенной дозы в поле облучения находилась в пределах 4–6 %. Перед облучением мышь фиксировали на плоской пластиковой пластине в дорсоВентральном положении с латеральным отведением правой задней конечности с привитой опухолью. При облучении протонами мышь на пластине фиксировали вертикально в специально регулируемой станине [18] и с помощью световых указателей позиционировали центр опухоли на ось горизонтального пучка (диаметр пучка 15 мм). Проводили однократное локальное воздействие на СКЭ протонами с энергией 78–90 МэВ в дозе 15 Гр. Облучение в выбранных дозах вызывало частичную задержку опухолевого роста, что обеспечивало возможность оценки радиосенсибилизирующего эффекта соединения T1167 в комбинированной терапии.

Схема экспериментов

Ориентировочное значение ЛД₅₀ соединения T1167 определяли при однократном внутрибрюшинном введении мышам BALB/c по методу Дейхмана-Лебланка в диапазоне доз 60–280 мг/кг (n = 10), с учетом которого далее проводили детальную оценку токсичности методом пробит-анализа по Литчфилду и Уилкоксону [ГОСТ 12.1.007-76, 2007¹; 19–21]. T1167 вводили по следующей схеме (табл. 1).

¹ ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда, (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2) [State Standard "System of labor safety standards, (SSBT). Occupational safety standards system. Noxious substances. Classification and general safety requirements" (with Amendments No. 1, 2) (In Russ.)]

Таблица 1

Схема определения токсичности соединения Т1167 при однократном внутрибрюшинном введении по методу Литчфилда и Уилкоксона

Table 1

Scheme for determining the toxicity of compound T1167 by single intraperitoneal injection using the Litchfield and Wilcoxon method]

Доза (мг/кг) [Dose (mg/kg)]	40	50	70	90	110	130
Количество животных [Number of animals]	5	5	5	5	7	5

В первые часы наблюдения мышей помещали в специализированное устройство для оценки токсичности [22], общий срок наблюдения за животными составлял 14 суток.

Для изучения противоопухолевых эффектов комбинации соединения Т1167 и ионизирующего излучения проведены три независимых эксперимента на мышах F₁(CBA×C₅₇Bl/6j). Схема исследований отражена в таблице 2.

Таблица 2

Экспериментальные схемы комбинированной терапии карциномы Эрлиха *in vivo*

Table 2

Experimental schemes for combined therapy of Ehrlich carcinoma *in vivo*]

Параметры [Parameters]	Эксперимент 1 [Experiment 1]	Эксперимент 2 [Experiment 2]	Эксперимент 3 [Experiment 3]
Контрольная группа (нелеченные животные с опухолью) [Control group (untreated animals with tumors)]	Изотонический 0,9 % раствор NaCl в день начала воздействий, n = 20 [Isotonic 0,9 % NaCl solution on the day of exposure]	Изотонический 0,9 % раствор NaCl в день начала воздействий, n = 14 [Isotonic 0,9 % NaCl solution on the day of exposure]	Изотонический 0,9 % раствор NaCl в день начала воздействий, n = 12 [Isotonic 0,9 % NaCl solution on the day of exposure]
Группа Т1167 [Group T1167]	30 мг/кг (8 и 10 сутки), n = 20 [30 mg/kg (days 8 and 10)]	30 мг/кг (7 и 9 сутки), n = 14 [30 mg/kg (days 7 and 9)]	30 мг/кг (7 и 9 сутки), n = 11 [30 mg/kg (days 7 and 9)]
Группа облучения [Group of irradiation]	Электроны 15 Гр, однократно (8 сутки), n = 15 [Electrons of 15 Gy, once (8 days)]	Электроны 8 Гр × 3 дня, фракционировано (7–9 сутки, 24 Гр), n = 14 [Electrons 8 Gy × 3 days, fractionated (7–9 days, 24 Gy)]	Протоны 15 Гр, однократно (7 сутки), n = 14 [Protons of 15 Gy, once (7 days)]
Группа комбинированного воздействия [Combined exposure group]	Электроны + Т1167, n = 14 [Electrons + T1167]	Электроны + Т1167, n = 15 [Electrons + T1167]	Протоны + Т1167, n = 13 [Protons + T1167]
Извлечение опухоли [Tumor extraction]	24 сутки [24 days]	21 сутки [21 days]	28 сутки [28 days]

n – количество животных в группе [n is the number of animals in a group].

Динамику опухолевого роста оценивали морфометрически в соответствии с ранее опубликованной методикой [23], погрешность измерения составляла не более 0,5 мм. Пока-

затели объема опухоли для каждого животного нормировали к исходному объему в день начала воздействий, отображали в относительных единицах (отн. ед.), вычисляли тор-

можение опухолевого роста (ТРО, %). Опухолевые узлы после извлечения фотографировали. Мониторинг массы тела мышей осуществляли с помощью лабораторных весов AND HL-3000LWP (Япония), регулярно калибруемых для поддержания погрешности в пределах 0,1 г.

Статистическая обработка

Оценку значимости межгрупповых различий показателей проводили путем дисперсионного анализа Краскела-Уоллиса с апостериорным анализом по У-критерию Манна-Уитни с поправками Холма-Бонферрони. Различия полагали статистически значимыми при $p < 0,05$. Расчеты выполнены с помощью программного пакета Statistica 12 (StatSoft Inc.,

Tulsa, OK, USA), величины приведены в виде $M \pm SD$. Графическое представление данных осуществляли в программе OriginPro 8 (OriginLab Corp., USA).

Результаты и обсуждение

Результаты токсикологического исследования показали, что соединение T1167 относится к третьему классу токсичности и опасности (вещество умеренно токсичное). Показатель LD_{50} для мышей при внутрибрюшинном введении составил 60 мг/кг [19–21].

Облучение электронами в дозе 15 Гр и применение T1167 (30 мг/кг) в монорежиме оказывали сходное влияние на рост СКЭ (рис. 1).

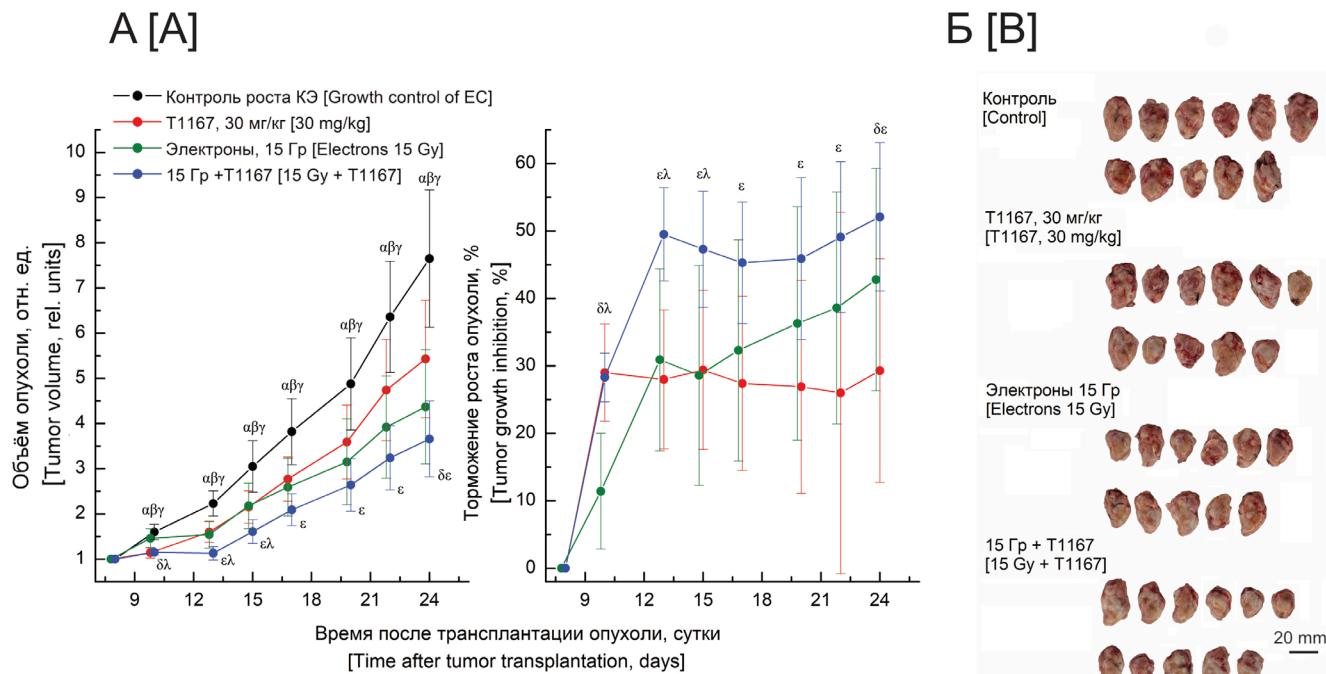


Рис. 1. Влияние T1167 и однократного воздействия электронами в дозе 15 Гр на рост и торможение СКЭ у мышей F₁(CBA×C₅₇Bl/6j), (А). Графические отклонения соответствуют SD. Символы α – значимые различия ($p < 0,01$) между группами (T1167)/(Контроль), β – (15 Гр)/(Контроль), γ – (15 Гр+T1167)/(Контроль), δ – (T1167/15 Гр), ε – (15 Гр+T1167)/(T1167), λ – (15 Гр+T1167)/(15 Гр); ТРО ($p < 0,01$), символы: δ – (T1167/15 Гр), ε – (15 Гр+T1167)/(T1167), λ – (15 Гр+T1167)/(15 Гр). (Б) – внешний вид опухолевых узлов СКЭ, извлеченных на 24 сутки роста

[**Fig. 1.** Effect of T1167 and a single exposure to electrons at a dose of 15 Gy on the growth and inhibition of SEC in F₁(CBA×C₅₇Bl/6j) mice. Graphical deviations correspond to SD. Symbols α – significant differences ($p < 0.01$) between groups (T1167)/(Control), β – (15 Gy)/(Control), γ – (15 Gy+T1167)/(Control), δ – (T1167/15 Gy), ε – (15 Gy+T1167)/(T1167), λ – (15 Gy+T1167)/(15 Gy). TGI ($p < 0.01$) symbols: δ – (T1167/15 Gy), ε – (15 Gy+T1167)/(T1167), λ – (15 Gy+T1167)/(15 Gy). (B) – the appearance of the tumor nodes of SEC, extracted on the 24th day of growth]

Через 24 часа после первой инъекции соединения T1167 торможение роста СКЭ достигало максимума (ТРО 29 %), что на 10 сутки превышало эффекты электронного воздействия в среднем на 18 %. Вторая инъекция не усиливала, но обеспечивала стабильные противоопухолевые эффекты на протяжении всего срока наблюдения (ТРО 26–29 %). Действие электронов развивалось через 5 суток после облучения (ТРО 30 %), постепенно увеличивалось и достигало максимума к концу наблюдений (ТРО 43 %), превышало эффекты T1167 в среднем на 14 %. В условиях комбинированного воздействия на опухоль двукратное введение T1167 увеличивало эффекты облучения на протяжении всего срока в среднем на 9–19 %. Статистически значимое увеличение

эффектов облучения наблюдалось до 15 суток (17–19 %), оставалось на уровне 9–13 % до конца эксперимента. В первые дни после комбинированного воздействия (9–15 сутки) у животных опытных групп было зафиксировано уменьшение показателя прироста массы тела в пределах 1–9 % в сравнении с нелеченным контролем, что, вероятно, было связано с задержкой опухолевого роста. К окончанию эксперимента вес мышей в опытных группах нормализовался.

Комбинированное применение соединения T1167 с фракционированным электронным облучением приводило к более выраженному увеличению индекса ТРО по сравнению с комбинацией, включающей однократное облучение (рис. 2).

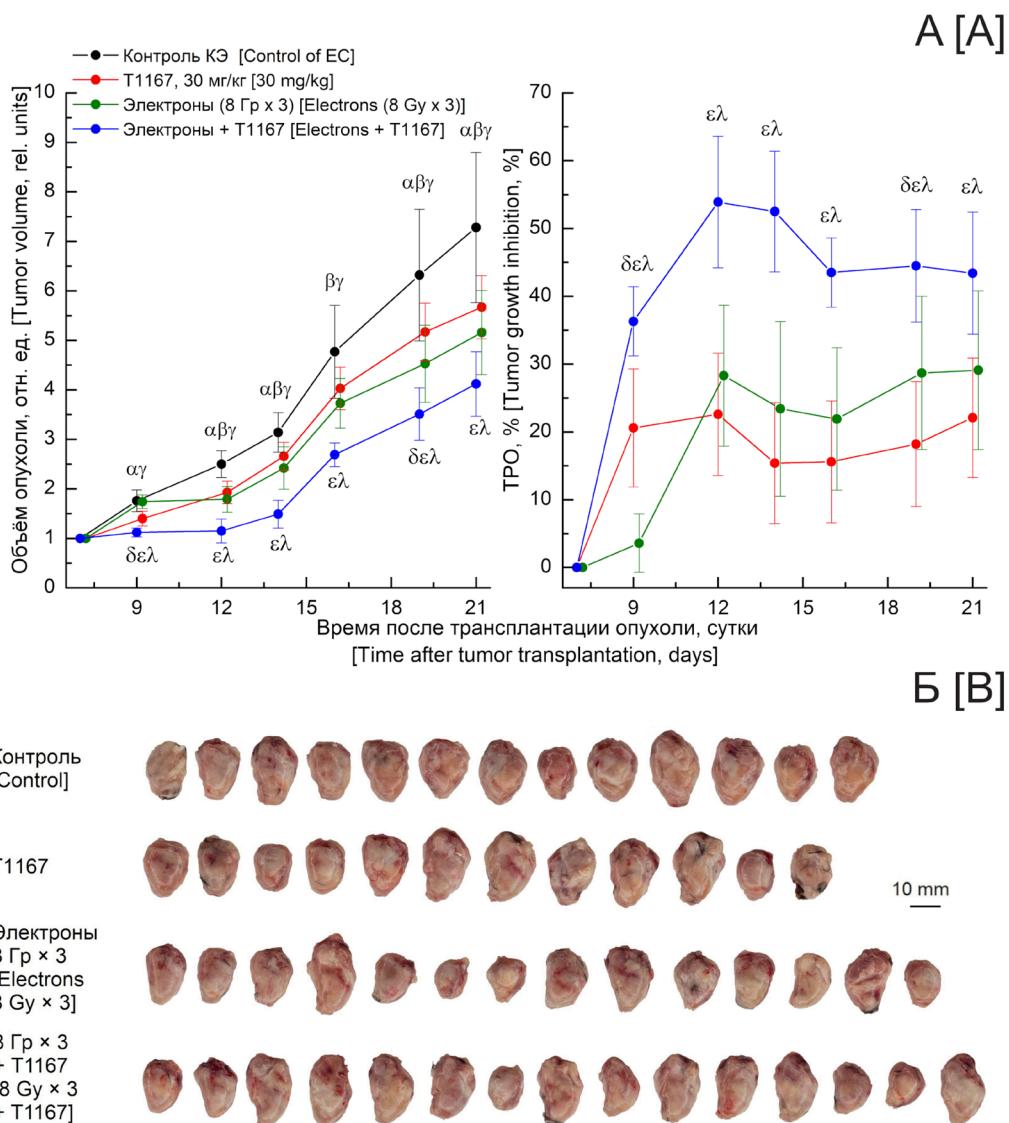


Рис. 2. Влияние T1167 и фракционированного воздействия электронами в суммарной дозе 24 Гр на рост и торможение СКЭ у мышей F₁(CBA×C₅₇Bl/6j), (А). Графические отклонения соответствуют SD. Символы: α – значимые различия ($p < 0,01$) между группами (T1167)/(Контроль), β – ([8 Гр × 3])/(Контроль), γ – ([8 Гр × 3] + T1167)/(Контроль), δ – (T1167/[8 Гр × 3]), ε – ([8 Гр × 3] + T1167)/(T1167), λ – ([8 Гр × 3] + T1167)/([8 Гр × 3]). ТРО, значимые различия ($p < 0,01$), символы: δ – (T1167/15 Гр), ε – (15 Гр+ T1167)/(T1167), λ – (15 Гр+ T1167)/(15 Гр). (Б) – внешний вид опухолевых узлов СКЭ, извлеченных на 21 сутки роста

[**Fig. 2.** Effect of T1167 and fractionated electron exposure at a total dose of 24 Gy on the growth and inhibition of SEC in F₁(CBA×C₅₇Bl/6j) mice (A). Graphical deviations correspond to SD. Significant differences ($p < 0.01$), symbols α – between groups (T1167)/(Control), β – (15 Gy)/(Control), γ – (15 Gy+T1167)/(Control), δ – (T1167/15 Gy), ε – (15 Gy+T1167)/(T1167), λ – (15 Gy+T1167)/(15 Gy). TGI significant differences ($p < 0.01$), symbols: δ – (T1167/15 Гр), ε – (15 Гр+ T1167)/(T1167), λ – (15 Гр+ T1167)/(15 Гр). (B) – the appearance of the tumor nodes of SEC, extracted on the 21th day of growth]

При монотерапии соединение T1167 демонстрировало умеренный, но статистически значимый ингибирующий эффект на рост опухоли (ТРО 15–23 %), достигая максимального подавления торможения через 72 часа после второй инъекции. В группе, получавшей только облучение, торможение роста СКЭ отмечалось лишь после третьей фракции, составляя 28 %, и сохранялось на стабильном статистически значимом уровне (22–29 %). Комбинированное воздействие уже на 9 сутки исследования превосходило эффект изолированного электронного облучения на 32 %, монотерапии T1167 – на 15 %. В течение всего периода наблюдения

преимущество комбинированного режима над монотерапией облучением составляло 16–32 %, а над изолированным применением T1167 – 15 – 38 %.

На фоне стабильного прироста массы тела в контроле, в ранние сроки наблюдения (7–14 сутки) в опытных группах было отмечено снижение массы тела мышей: до 5–7 % в группе монотерапии T1167 (значимые различия на 9–14 сутки), до 3 % в группе фракционированного облучения (значимые различия на 9 и 21 сутки), до 6–8 % – в группе комбинированного воздействия (значимые различия на 9–12 сутки).

Стремительный рост СКЭ сопровождался гибелю 1-2 мышей в группах нелеченого контроля и T1167, в то время как фракционированное облучение и комбинированное воздействие сохраняли 100 % выживаемость в группах.

Перспективные результаты получены в исследовании противоопухолевой комбинации протонного излучения и соединения T1167 в дозе 30 мг/кг при двукратном введении (рис. 3).

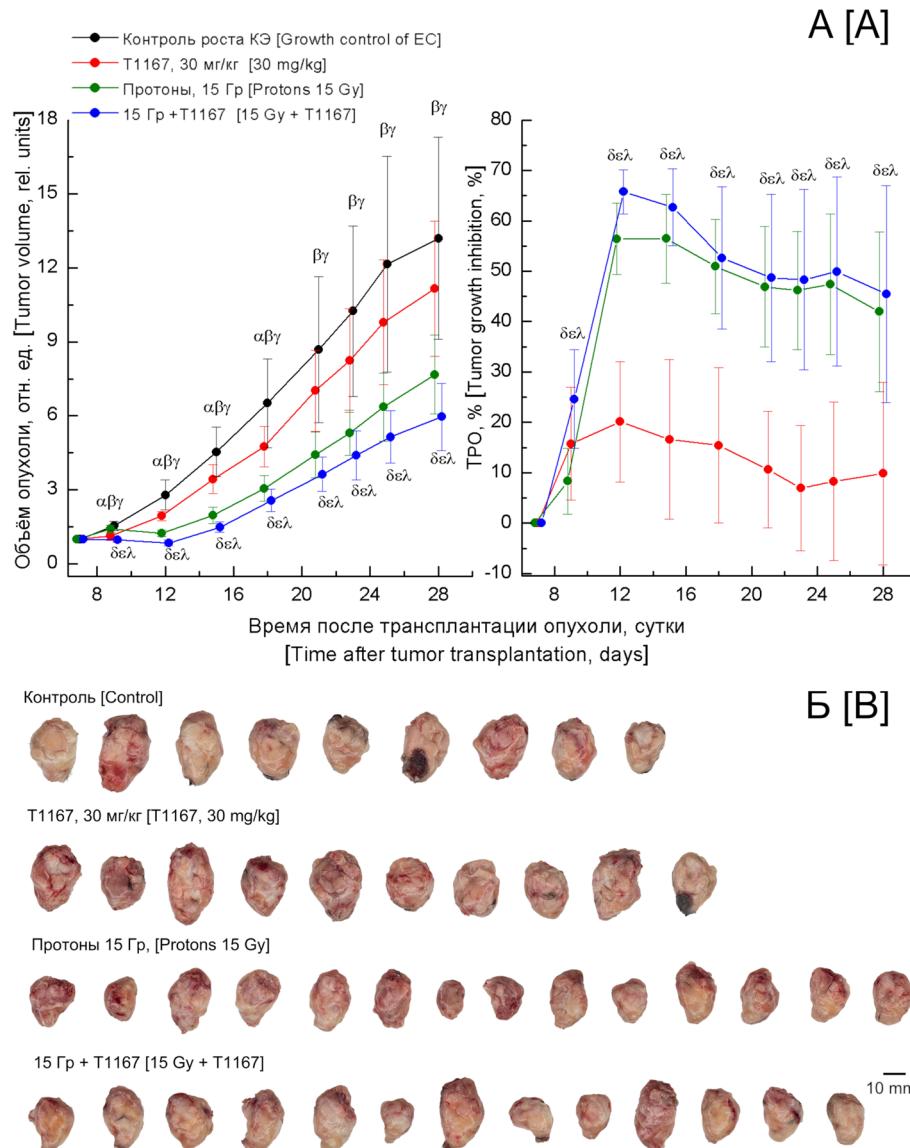


Рис. 3. Влияние T1167 и однократного облучения протонами в дозе 15 Гр на рост и торможение СКЭ у мышей F1(CBA×C57Bl/6j), (А). Графические отклонения соответствуют SD. Символы α – значимые различия ($p < 0,05$) между группами (T1167)/(Контроль), β – (15 Гр)/(Контроль), γ – (15 Гр + T1167)/(Контроль), δ – (T1167)/(15 Гр), ε – (15 Гр + T1167)/(T1167), λ – (15 Гр + T1167)/(15 Гр). ТРО, значимые различия ($p < 0,05$), символы: δ – (T1167)/(15 Гр), ε – (15 Гр + T1167)/(T1167), λ – (15 Гр + T1167)/(15 Гр).

(Б) – внешний вид опухолевых узлов СКЭ, извлеченных на 28 сутки роста

[**Fig. 3.** Effect of T1167 and a single proton irradiation at a dose of 15 Gy on the growth and inhibition of SEC in F1(CBA×C57Bl/6j) mice (A). Graphical deviations correspond to SD. Symbols α – significant differences ($p < 0.05$) between groups (T1167)/(Control), β – (15 Gy)/(Control), γ – (15 Gy + T1167)/(Control), δ – (T1167/15 Gy), ε – (15 Gy + T1167)/(T1167), λ – (15 Gy + T1167)/(15 Gy). TGI, significant differences ($p < 0.05$), symbols: δ – (T1167/15 Gy), ε – (15 Gy + T1167)/(T1167), λ – (15 Gy + T1167)/(15 Gy). (B) – the appearance of the tumor nodes of SEC, extracted on the 28th day of growth]

Две инъекции T1167 обеспечивали торможение опухолевого роста в пределах 24–30 %, что на 9 сутки значимо превышало эффекты протонов в дозе 15 Гр. Далее противоопухолевое действие протонного излучения развивалось к 12–15 суткам и вдвое превышало эффекты T1167, макси-

мальный индекс ТРО в эти сроки составлял 55–57 %. Торможение роста опухоли снижалось постепенно, находилось на значимом уровне. При комбинации T1167 и протонов уже на 9 сутки торможение роста опухоли находилось на уровне 37 %, в то время как в группе протонов эффект только начи-

нал реализовываться (ТРО 10 %). Своего максимума показатель ТРО достигал на 12–15 сутки наблюдений и составлял 67–69 %. Особенно на ранних сроках использованная комбинированная терапия обеспечивала более выраженное подавление роста СКЭ в сравнении с радиотерапией протонами (увеличение ТРО на 14–27 %). К 28 суткам ТРО группы комбинированного воздействия на 13 % превышало эффекты, реализуемые протонами. При этом значимость различий с другими группами наблюдалась на всех сроках. В первые пять дней после воздействия (9–12-е сутки эксперимента) у животных опытных групп отмечалось уменьшение показателя прироста массы тела в пределах 2–8 %, который нормализовался к окончанию наблюдений. В контрольной группе стремительный рост СКЭ с 21 суток сопровождался гибелью трех мышей. В группе двукратного введения Т1167 был отмечен лишь единичный случай гибели. Протонное облучение и комбинация с исследуемым соединением обеспечивали поддержание 100 % выживаемости животных.

В современной клинической практике лучевая терапия часто интегрируется в комплексные протоколы с химиотерапевтическими препаратами, таргетными агентами, хирургическим вмешательством, гормональной и иммунотерапией. Такая стратегия направлена на преодоление радиорезистентности злокачественных новообразований. Подобные комбинированные подходы, базирующиеся на углубленном понимании молекулярных механизмов радиочувствительности, способствуют существенному увеличению терапевтического индекса за счет селективной сенсибилизации опухолевой ткани [25, 27].

Наблюдаемые различия в противоопухолевой эффективности между режимами облучения и их комбинацией с соединением Т1167 могут иметь следующее обоснование. Более высокая эффективность комбинации с однократным протонным воздействием (прирост ТРО на 27 % против 19 % для однократного воздействия электронами) связана с фундаментальными различиями в физике передачи энергии и последующими биологическими эффектами. Как известно, протоны характеризуются выраженным пиком Брэгга и значительно более высокой ЛПЭ в области мишени (3–8 кэВ/мкм против 0,2 кэВ/мкм для электронов) [24–29]. Повышенная ЛПЭ обусловливает формирование более плотных и структурно сложных кластеров повреждений ДНК, преимущественно двунитевых разрывов, которые характеризуются низкой репаративной эффективностью в силу недостаточности системы гомологичной рекомбинации и являются субстратом для ошибок негомологичного соединения концов. Высокая ОБЭ протонов имеет высокое значение для преодоления гипоксической радиорезистентности, что, по-видимому, явилось ключевым фактором их превосходства в нашем исследовании.

Вместе с тем наибольшая эффективность (32 %) была достигнута при комбинации Т1167 с фракционированным облучением электронами, что является ожидаемым результатом с точки зрения радиобиологии. Фракционирование дозы позволяет реализовать перераспределение клеток по фазам клеточного цикла с синхронизацией популяции в наиболее радиочувствительные фазы (G_2/M), а также инициировать процессы реоксигенации гипоксических клеточных пулов между сеансами облучения, повышая их уязвимость к последующей дозе [25]. Потенцирование этих эф-

фектов соединением Т1167 может быть опосредовано ингибированием ключевых ферментов репарации ДНК, что приводит к нарушению процессов восстановления повреждений и накоплению летальных хромосомных aberrаций, либо же усилением апоптотического ответа в опухолевых клетках с массивными повреждениями (работы по детальному исследованию противоопухолевых механизмов действия Т1167 в настоящее время ведутся).

Снижение эффектов моно- и комбинированной терапии Т1167 на терминальной стадии может указывать на: частичное восстановление пролиферативной активности опухолевых клеток вследствие прекращения терапевтического воздействия (воздействие – на 7–9 сутки, извлечение опухолевых узлов – 21–28 сутки); выраженную межгрупповую вариабельность ответа на лечение, что характерно для моделей *in vivo*.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности продолжения исследований в данном направлении, в частности модификации схем химиолучевого воздействия с целью повышения противоопухолевых эффектов: оптимизации временного интервала между введениями Т1167 и облучением, добавление в схему терапии противоопухолевых агентов других классов (ингибиторы ангиогенеза, иммуномодуляторы).

Заключение

Результаты исследований свидетельствуют, что производное индол-3-карбоновой кислоты Т1167 способно усиливать противоопухолевые эффекты ионизирующих излучений разного качества. Определена средняя летальная доза Т1167 при внутрибрюшинном введении мышам, $LD_{50} = 60$ мг/кг. Двукратные инъекции Т1167 в режиме моно-терапии вызывали стабильное торможение роста СКЭ, достигающее 30 %. Комбинированное применение Т1167 с ионизирующим облучением существенно усиливало терапевтическую эффективность: индекс ТРО повышался на 19 % с однократным облучением электронами, на 32 % – с фракционированным облучением электронами и на 27 % – с однократным облучением протонами. Кроме того, экспериментальная комбинированная терапия повышала выживаемость животных-опухоленосителей, не вызывая значимых токсических эффектов.

Полученные результаты указывают на перспективность дальнейшего изучения комбинированных режимов химиолучевой терапии, включающих применение производных индол-3-карбоновой кислоты. Дальнейшие исследования механизмов взаимодействия этих соединений и ионизирующего излучения должны включать оценку влияния на основные патофизиологические механизмы развития неоплазий, ключевые пути репарации ДНК и апоптоза.

Облучение животных выполнено на оборудовании ЦКП «Радиологические и клеточные технологии» ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Солдатова О.В. – анализ литературных источников, планирование и проведение экспериментальных исследований, обработка и систематизация первичных материалов исследования, составление рукописи, утверждение публикуемой версии рукописи.

Филимонова М.В. – химико-фармакологический дизайн соединения, планирование работы, составление рукописи, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Сурикова В.И. – химико-фармакологический дизайн и наработка необходимого количества субстанции для проведения исследований *in vivo*.

Шитова А.А. – планирование работы, проведение экспериментальных исследований по оценке токсикологических показателей, противоопухолевой активности.

Николаев К.А. – обработка, графическое представление полученных данных, составление рукописи.

Рыбачук В.А. – обработка, графическое представление полученных данных, составление рукописи.

Косаченко А.О. – обработка, графическое представление полученных данных, составление рукописи.

Корякин С.Н. – планирование работы на облучательских установках.

Шегай П.В. – административное руководство, утверждение публикуемой версии рукописи.

Иванов С.А. – административное руководство, утверждение публикуемой версии рукописи.

Каприн А.Д. – административное руководство, утверждение публикуемой версии рукописи.

Филимонов А.С. – планирование работы, обработка, статистический анализ и графическое представление полученных данных, пересмотр и окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела радиационной биофизики МРНЦ им. А.Ф. Цыба за помощь в подготовке и проведении работ на облучательских установках.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Anand U., Dey A., Chandel A.K.S. et al. Cancer chemotherapy and beyond: Current status, drug candidates, associated risks and progress in targeted therapeutics // Genes & Diseases. 2023. Vol. 10, № 4. P. 1367–1401. DOI: 10.1016/j.gendis.2022.02.007
2. Twelves C., Jove M., Gombos A., Awada A. Cytotoxic chemotherapy: Still the mainstay of clinical practice for all subtypes metastatic breast cancer // Critical reviews in oncology/hematology. 2016. Vol. 100. P. 74–87. DOI: 10.1016/j.critrevonc.2016.01.021
3. Tilsed C.M., Fisher S.A., Nowak A.K. et al. Cancer chemotherapy: insights into cellular and tumor microenvironmental mechanisms of action // Frontiers in Oncology. 2022. Vol. 12. P. 960317. DOI: 10.3389/fonc.2022.960317
4. Baumann M., Krause M., Overgaard J. et al. Radiation oncology in the era of precision medicine // Nature Reviews Cancer. 2016. Vol. 16, № 4. P. 234–249. DOI: 10.1038/nrc.2016.18
5. Falzone L., Salomone S., Libra M. Evolution of Cancer Pharmacological Treatments at the Turn of the Third Millennium // Frontiers in pharmacology. 2018. Vol. 9. P. 1300. DOI: 10.3389/fphar.2018.01300
6. Wang K., Terper J.E. Radiation therapy-associated toxicity: Etiology, management, and prevention // CA: a cancer journal for clinicians. 2021. Vol. 71, № 5. P. 437–454. DOI: 10.3322/caac.21689
7. Белевич Ю.В., Чойнзонов Е.Л., Гольдберг В.Е. и др. Противоопухолевая химиотерапия в комбинированном лечении больных злокачественными новообразованиями гортани и гортаноглотки // Вопросы онкологии. 2018. Т. 64, № 5. С. 607–611.
8. Панкратов В.А., Андреев В.Г., Рожнов В.А. и др. Одновременное применение химио- и лучевой терапии при самостоятельном консервативном и комбинированном лечении больных местно-распространенным раком гортани и гортаноглотки // Сибирский онкологический журнал. 2007. № 1. С. 18–22.
9. Филимонова М.В., Макарчук В.М., Шевченко Л.И., Филимонов А.С. Исследование влияния ингибитора NOS T1023 в сочетании с γ-излучением и циклофосфамидом на рост и метастазирование карциномы легких Льюис // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2019. Т. 63, № 3. С. 105–109. DOI: 10.25557/0031-2991.2019.03.105-109
10. Filimonova M., Shitova A., Soldatova O. et al. Combination of NOS- and PDK-Inhibitory Activity: Possible Way to Enhance Antitumor Effects // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23, № 2. P. 730. DOI: 10.3390/ijms23020730
11. Narovlyansky A.N., Filimonova M.V., Tsyshkova N.G. et al. In Vitro Antiviral Activity of a New Indol-3-carboxylic Acid Derivative Against SARS-CoV-2 // Acta Naturae. 2023. Vol. 15, № 4. P. 83–91. DOI: 10.32607/actanaturae.2662
12. Наровлянский А.Н., Филимонова М.В., Цышкова Н.Г. и др. Пат. № 2820633 Российская Федерация, МПК C07D 403/06, A61P 31/12. Производное индол-3-карбоновой кислоты, обладающее противовирусной активностью в отношении SARS-COV-2. опубл. 06.06.2024, Бюл. № 16.
13. Наровлянский А.Н., Филимонова М.В., Цышкова Н.Г. и др. Пат. № 2835077 Российской Федерации, МПК C07D 403/06, A61K 31/454. Получение водорастворимого соединения дигидрохлорида 6-бром-1-метил-5-метокси-2-(1-пиперидинометил)-3-(2-диэтиламиноэтокси)карбонилиндола. опубл. 21.02.2025, Бюл. № 6.
14. Филимонова М.В., Сурикова В.И., Солдатова О.В. и др. Пат. № 2782931 Российской Федерации, МПК C07D 209/42, C07D 401/06, C07D 409/06, A61K 31/405, A61P 35/00, A61P 37/02. Производные индол-3-карбоновой кислоты, обладающие противоопухолевой активностью. опубл. 07.11.2022, Бюл. № 31.
15. Филимонова М. В., Солдатова О. В., Сурикова В. И. и др. Патент на изобр. № 2850169 Российская Федерация, МПК C07D 209/04, C07D 209/10, C07D 209/42, A61K 31/404, A61K 31/405, A61P 35/00. Усовершенствованный способ получения 1-метил-2-бромметил-3-карбэтокси-5-метокси-6-броминдола, подавляющего рост солидной карциномы Эрлиха и рака шейки матки у мышей. опубл. 05.11.2025, Бюл. № 31.
16. Филимонова М.В., Солдатова О.В., Сурикова В.И. и др. Заявка на изобр. № 2024127831 Российской Федерации, МПК C07D 209/42. Способ получения новых оригинальных хлорэтиламино-замещенных производных аминоалкильных эфиров индол-3-карбоновой кислоты, обладающих противоопухолевой активностью. опубл. 12.12.2024, Бюл. № 35.
17. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. Ч. 1 // под ред. А.Н. Миронова. М.: Гриф и К, 2012. С. 944.
18. Сабуров В.О., Солдатова О.В., Моисеев А.С. и др. Пат. № 224468 Российской Федерации, МПК A61D 3/00. Устройство для фиксации мелких лабораторных животных при проведении локального облучения задней конечности протонами. опубл. 26.03.2024, Бюл. № 9.
19. Березовская И.В. Прогноз безопасности лекарственных средств в доклинических токсикологических исследованиях // Токсикологический вестник. 2010. № 5 (104). С. 17–22.
20. Holm S. A simple sequentially rejective multiple test procedure // Scandinavian Journal of Statistics. 1979. Vol. 6, № 2. P. 65–70. JSTOR 4615733
21. Litchfield J.T., Wilcoxon F.A. Asimplified method of evaluating dose effect experiments // The Journal of pharmacology and experimental therapeutics. 1947. Vol .96, № 2. P. 99–113.

22. Филимонова М.В., Сабурова А.С., Макарчук В.М. и др. Пат. № 199874 Российской Федерации, МПК G09B 23/28, A01K 1/03. Устройство для оценки "острой" токсичности биологически активных соединений на мелких лабораторных животных. опубл. 24.09.2020, Бюл. № 27.
23. Filimonova M., Shitova A., Shevchenko L. et al. In Vitro Cytotoxic Potential and In Vivo Antitumor Effects of NOS/PDK-Inhibitor T1084 // International journal of molecular sciences. 2024. Vol. 25, № 17. P. 9711. DOI: 10.3390/ijms25179711.
24. Durante M., Loeffler J.S. Charged particles in radiation oncology // Nature Reviews Clinical Oncology. 2010. Vol. 7, № 1. P. 37–43. DOI: 10.1038/nrclinonc.2009.183
25. Held K.D., Kawamura H., Kaminuma T. et al. Effects of Charged Particles on Human Tumor Cells // Frontiers in Oncology. 2016. Vol. 6, № 23. DOI: 10.3389/fonc.2016.00023
26. Lühr A., Von Neubeck C., Krause M., Troost E.G.C. Relative biological effectiveness in proton beam therapy – Current knowledge and future challenges // Clinical and Translational Radiation Oncology. 2018. Vol. 9. P. 35–41. DOI: 10.1016/j.ctro.2018.01.006
27. Szymonowicz K., Krysztofiak A., Linden J.V. et al. Proton Irradiation Increases the Necessity for Homologous Recombination Repair Along with the Indispensability of Non-Homologous End Joining // Cells. 2020. Vol. 9, № 4. P. 889. DOI: 10.3390/cells9040889
28. Бекетов Е.Е., Исаева Е.В., Соловьев А.Н. и др. Изучение зависимости биологической эффективности тяжелых заряженных частиц от линейной передачи энергии и оценка влияния приобретенной радиорезистентности опухолевых клеток на последующее облучение ионами. Труды регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований. 2020. С. 52–60.
29. Бекетов Е.Е., Исаева Е.В., Наседкина Н.В. и др. Сформированная резистентность опухолевых клеток линии B16 к протонам после длительного фракционированного облучения электронами // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2020. Т. 29, № 4. С. 69–83.

Поступила: 11.06.2025

Солдатова Ольга Васильевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационной фармакологии, аспирант, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России. **Адрес для переписки:** 249036, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Королёва, д. 4; E-mail: ovsoldatova97@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1178-3560

Филимонова Марина Владимировна – доктор биологических наук, заведующая лабораторией радиационной фармакологии, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0002-9690-4746

Сурикова Валентина Ивановна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории радиационной фармакологии, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0003-1329-8312

Шитова Анна Андреевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационной фармакологии, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0001-5512-9096

Николаев Кирилл Анатольевич – лаборант лаборатории радиационной фармакологии, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0003-0518-8228

Рыбачук Виталий Александрович – младший научный сотрудник лаборатории радиационной фармакологии, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0001-8820-9965

Косаченко Александр Олегович – лаборант лаборатории радиационной фармакологии, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал «Национального медицинского исследовательского центра радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0003-2173-388X

Корякин Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, заведующий отделом радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0003-0128-4538

Шегай Петр Викторович – кандидат медицинских наук, заместитель генерального директора Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России по науке, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0001-9755-1164

Иванов Сергей Анатольевич – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный врач Российской Федерации, директор Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба – филиала Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0001-7689-6032

Каприн Андрей Дмитриевич – доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заслуженный врач Российской Федерации, генеральный директор Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0001-8784-8415

Филимонов Александр Сергеевич – научный сотрудник лаборатории радиационной фармакологии, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0002-4398-1764

Для цитирования: Солдатова О.В., Филимонова М.В., Суринова В.И., Шитова А.А., Николаев К.А., Рыбачук В.А., Косаченко А.О., Корякин С.Н., Шегай П.В., Иванов С.А., Каприн А.Д., Филимонов А.С. Радиомодифицирующие свойства бромзамещенного производного индол-3-карбоновой кислоты при протонной и электронной терапии карциномы Эрлиха *in vivo*// Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 19–30. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-19-30

Radiomodifying properties of a bromo-substituted derivative of indole-3-carboxylic acid in proton and electron therapy of Ehrlich carcinoma *in vivo*

Olga V. Soldatova¹, Marina V. Filimonova¹, Valentina I. Surinova¹, Anna A. Shitova¹, Kirill A. Nikolaev¹, Vitaliy A. Rybachuk¹, Alexander O. Kosachenko¹, Sergey N. Koryakin¹, Petr V. Shegai², Sergey A. Ivanov¹, Andrey D. Kaprin², Alexander S. Filimonov¹

¹ A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the “National Medical Research Radiological Centre” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

² National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

Despite significant progress in the field of chemoradiation antitumor therapy, the introduction of new pharmacological agents and radiation response modifiers aimed at increasing the therapeutic index of radiation therapy remains one of the priority tasks of experimental oncology and radiobiology. Objective of the study is evaluation of the antitumor effects of the combined use of ionizing radiation (electrons, protons) and a new derivative of indole-3-carboxylic acid – 1-methyl-2-bromomethyl-3-ethoxycarbonyl-5-methoxy-6-bromindole. Materials and Methods: The study was conducted on female $F_1(CBA \times C57BL/6J)$ $F1(CBA \times C57BL/6J)$ mice with Ehrlich carcinoma transplanted into the right hind limb. The compound was administered intraperitoneally at a dose of 30 mg/kg on the day of irradiation and 48 hours after the first injection. The experimental methods included toxicometric and morphometric analyses. Results and Discussion: The median lethal dose of the compound was determined for intraperitoneal administration to mice, $LD_{50} = 60$ mg/kg. Double injections in the monotherapy mode caused stable inhibition of tumor growth, which developed to 30 %. The combined use of radiation exposure and the studied compound led to significant increasing of therapeutic efficacy indicating the presence of synergistic interaction: the tumor growth inhibition index increased by 19 % with single electron irradiation, by 32 % with fractionated electron irradiation, and by 27 % with single proton irradiation. In addition, the experimental combination therapy, along with significant suppression of tumor growth, increased the survival of tumor-bearing animals without causing significant toxic effects. Conclusion: The obtained results indicate the prospects for further study of combined regimens of radiation therapy and indole-3-carbinol derivatives. Further studies of the mechanisms of interaction of these compounds and ionizing radiation should include an assessment of the effect on the main pathophysiological mechanisms of neoplasia development, key pathways of DNA repair and apoptosis.

Key words: antitumor compounds, indole-3-carboxylic acid derivatives, alkylating agents, *in vivo* antitumor efficacy, combined chemoradiotherapy.

Authors' personal contribution

Soldatova O.V. – analysis of literary sources, planning and conducting experimental studies, processing and systematization of primary research materials, drafting the manuscript, approval of the published version of the manuscript.

Filimonova M.V. – chemical and pharmacological design of the compound, work planning, drafting the manuscript, final approval of the published version of the manuscript.

Surinova V.I. – chemical and pharmacological design and production of the required amount of substance for *in vivo* studies.

Shitova A.A. – work planning, conducting experimental studies to assess toxicological parameters and antitumor activity.

Nikolaev K.A. – processing, graphic presentation of the obtained data, drafting the manuscript.

Rybachuk V.A. – processing, graphic presentation of the obtained data, drafting the manuscript.

Kosachenko A.O. – processing, graphic presentation of the obtained data, drafting the manuscript.

Koryakin S.N. – planning of work on irradiation facilities.

Shegai P.V. – administrative management, approval of the published version of the manuscript.

Ivanov S.A. – administrative management, approval of the published version of the manuscript.

Kaprin A.D. – administrative management, approval of the published version of the manuscript.

Olga V. Soldatova

A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center

Address for correspondence: 4, Koroleva Str., Obninsk, Kaluga Region, 249036, Russia; E-mail: ovsoldatova97@gmail.com

Filimonov A.S. – work planning, processing, statistical analysis and graphical presentation of the obtained data, revision and final approval of the published version of the manuscript.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the staff of the Department of Radiation Biophysics of the A.F. Tsyb MRRC for their assistance in preparing and conducting work on irradiation facilities.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

References

1. Anand U, Dev A, Chandel AKS, Sanyal R, Mishra A, Pandey DK, et al. Cancer chemotherapy and beyond: Current status, drug candidates, associated risks and progress in targeted therapeutics. *Genes & diseases*. 2022;10(4): 1367–1401.
2. Twelves C, Jove M, Gombos A, Awada A. Cytotoxic chemotherapy: Still the mainstay of clinical practice for all subtypes metastatic breast cancer. *Critical reviews in oncology/hematology*. 2016;100: 74–87.
3. Tilset CM, Fisher SA, Nowak AK, Lake RA, Lesterhuis WJ. Cancer chemotherapy: insights into cellular and tumor microenvironmental mechanisms of action. *Frontiers in oncology*. 2022;12: 960317.
4. 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.
5. Falzone L, Salomone S, Libra M. Evolution of Cancer Pharmacological Treatments at the Turn of the Third Millennium. *Frontiers in Pharmacology*. 2018;9: 1300.
6. Wang K, Tepper JE. Radiation therapy-associated toxicity: Etiology, management, and prevention. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2021;71(5): 437–454.
7. Belevich YuV, Choynzonov EL, Goldberg VE, Chizhevskaya SYu, Frolova IG, Chernov VI, et al. Antitumor chemotherapy in combined treatment of patients with cancer of the larynx and hypopharynx. *Voprosy Onkologii = Oncology Issues*. 2018;64(5): 607–611. (In Russian).
8. Pankratov VA, Andreev VG, Rozhnov VA, Gulidov IA, Baryshev VV, Buyakova ME, et al. Concurrent chemo- and radiation therapy in conservative stand-alone and combined treatment of patients with locally advanced laryngeal and laryngopharyngeal cancer. *Sibirskiy Onkologicheskiy Zhurnal = Siberian Journal of Oncology*. 2007;(1): 18–22. (In Russian).
9. Filimonova MV, Makarchuk VM, Shevchenko LI, Filimonov AS. Effect of a NOS inhibitor, T1023, in combination with γ -irradiation and cyclophosphamide on growth and metastasis of Lewis lung carcinoma. *Patologicheskaya Fiziologiya i Eksperimental'naya Terapiya = Pathological Physiology and Experimental Therapy*. 2019;63(3): 105–109. (In Russian).
10. Filimonova M, Shitova A, Soldatova O, Shevchenko L, Saburova A, Podosinnikova T, et al. Combination of NOS- and PDK-Inhibitory Activity: Possible Way to Enhance Antitumor Effects. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(2): 730.
11. Narovlyansky AN, Filimonova MV, Tsyshkova NG, Pronin AV, Grebennikova TV, Karamov EV, et al. In Vitro Antiviral Activity of a New Indol-3-carboxylic Acid Derivative Against SARS-CoV-2. *Acta Naturae*. 2023;15(4): 83–91.
12. Narovlyansky AN, Filimonova MV, Tsyshkova NG, Pronin AV, Grebennikova TV, Karamov EV, et al. Patent № 2820633 Russian Federation, IPC A61K 31/454, C07D 403/06, A61P 31/12. Indole-3-carboxylic acid derivative having antiviral activity on SARS-CoV-2. Published 06.06.2024, Bull. № 16. (In Russian).
13. Narovlyansky AN, Filimonova MV, Tsyshkova NG, Pronin AV, Grebennikova TV, Karamov EV, et al. Pat. № 2835077 Russian Federation, IPC C07D 403/06, A61K 31/454. Obtaining a water-soluble 6-bromo-1-methyl-5-methoxy-2-(1-piperidinomethyl)-3-(2-diethylaminoethoxy) carbonylindole dihydrochloride compound. Published 21.02.2025, Bull. № 6. (In Russian).
14. Filimonova MV, Surinova VI, Soldatova OV, Shitova AA, Tsyshkova NG, Filimonov AS, et al. Pat. № 2782931 Russian Federation, IPC C07D 209/42, C07D 401/06, C07D 409/06, A61K 31/405, A61P 35/00, A61P 37/02. Indol-3-carboxic acid derivatives with anti-tumor activity. Published 07.11.2022, Bull. № 31. (In Russian).
15. Filimonova MV, Soldatova OV, Surinova VI, Filimonov AS, Shitova AA, Rybachuk VA, et al. Pat. № 2850169 Russian Federation, IPC C07D 209/04, C07D 209/10, C07D 209/42, A61K 31/404, A61K 31/405, A61P 35/00. Improved method for synthesis of 1-methyl-2-bromomethyl-3-carbethoxy-5-methoxy-6-bromoindole inhibiting growth of Ehrlich solid carcinoma and cervical cancer in mice. Published 05.11.2025, Bull. № 31. (In Russian).
16. Filimonova MV, Soldatova OV, Surinova VI, Filimonov AS, Shitova AA, Rybachuk VA, et al. Patent application № 2024127831 Russian Federation, IPC C07D 209/42. Method for synthesis of novel original chloroethylamino-substituted derivatives of aminoalkyl esters of indole-3-carboxylic acid with antitumor activity. Published 12.12.2024, Bull. № 35. (In Russian).
17. Mironov AN, eds. Guidelines for conducting preclinical studies of drugs. Part one. Moscow: Grif i K; 2012. 944 p. (In Russian).
18. Saburov VO, Soldatova OV, Moiseev AS, Shitova AA, Golovanova OYu, Adarova AI, et al. Patent application № 224468 Russian Federation, IPC A61D 3/00. Device for fixation of small laboratory animals during local irradiation of the hind limb with protons. Published 26.03.2024, Bull. № 9. (In Russian).
19. Berezovskaya IV. Forecasting of medicinal products safety in preclinical toxicological studies. *Toksikologicheskiy Vestnik = Toxicological Review*. 2010;(5): 17–22. (In Russian).
20. Holm S. A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*. 1979;6(2): 65–70.
21. Litchfield JT, Wilcoxon FA. A simplified method of evaluating dose effect experiments. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*. 1947;96(2): 99–113.
22. Filimonova MV, Saburova AS, Makarchuk VM, Filimonov AS, Soldatova OV, Ksenofontova MP, et al. Pat. № 199874 Russian Federation, IPC G09B 23/28, A01K 1/03. Device for assessing acute toxicity of biologically active compounds in small laboratory animals. Published 24.09.2020, Bull. № 27. (In Russian).
23. Filimonova M, Shitova A, Shevchenko L, Soldatova O, Surinova V, Rybachuk V, et al. In vitro cytotoxic potential and in vivo antitumor effects of NOS/PDK-inhibitor T1084. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(17):9711;
24. Durante M, Loeffler JS. Charged particles in radiation oncology. *Nature Reviews Clinical Oncology*. 2010;7(1): 37–43.
25. Held KD, Kawamura H, Kaminuma T, Paz AE, Yoshida Y, Liu Q, et al. Effects of Charged Particles on Human Tumor Cells. *Frontiers in Oncology*. 2016;6: 23.
26. Lühr A, von Neubeck C, Krause M, Troost EGC. Relative biological effectiveness in proton beam therapy – Current knowledge and future challenges. *Clinical and Translational Radiation Oncology*. 2018;9: 35–41.
27. Szymonowicz K, Krysztofiak A, Linden JV, Kern A, Deycmar S, Oeck S, et al. Proton Irradiation Increases the Necessity for Homologous Recombination Repair Along with the Indispensability of Non-Homologous End Joining. *Cells*. 2020;9(4): 889.
28. Beketov EE, Isaeva EV, Solovyev AN, Arguchinskaya NV, Malakhov EP, Saburov VO, et al. Study of the dependence of biological effectiveness of heavy charged particles on linear energy transfer and evaluation of acquired tumor cell radioresistance impact on subsequent ion irradiation. Proceedings of the regional competition of fundamental research projects. 2020: 52–60. (In Russian).
29. Beketov EE, Isaeva EV, Nasedkina NV, Zamulaeva IA, Matchuk ON, Ulyanenko LN, et al. Acquired resistance of B16 tumor cell line to protons after long-term fractionated electron irradiation. *Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk*. 2020;29(4): 69–83. (In Russian).

Received: June 11, 2025

For correspondence: **Olga V. Soldatova** – Junior Researcher, Laboratory of Radiation Pharmacology, Postgraduate Student, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation (4, Koroleva Str., Obninsk, Kaluga Region, 249036, Russia; E-mail: ovsoldatova97@gmail.com)
ORCID: 0000-0002-1178-3560

Marina V. Filimonova – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Radiation Pharmacology, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0002-9690-4746

Valentina I. Surinova – Senior Researcher at the Laboratory of Radiation Pharmacology, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0003-1329-8312

Anna A. Shitova – Junior Researcher, Laboratory of Radiation Pharmacology, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0001-5512-9096

Kirill A. Nikolaev – Laboratory Assistant of the Radiation Pharmacology Laboratory, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0003-0518-8228

Vitaliy A. Rybachuk – Junior Researcher, Laboratory of Radiation Pharmacology, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0001-8820-9965

Alexander O. Kosachenko – Laboratory Assistant of the Radiation Pharmacology Laboratory, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0003-2173-388X

Sergey N. Koryakin – Candidate of Biological Sciences, Head of the Department of Radiation Biophysics, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0003-0128-4538

Petr V. Shegay – Candidate of Medical Sciences, Deputy Director General for Science of the National Medical Research Center of Radiology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0001-9755-1164

Sergey A. Ivanov – Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Honored Doctor of the Russian Federation, Director of the A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0001-7689-6032

Andrey D. Kaprin – Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Honored Doctor of the Russian Federation, Director General of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0001-8784-8415

Aleksander S. Filimonov – Researcher, Laboratory of Radiation Pharmacology, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – the branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0002-4398-1764

For citation: **Soldatova O.V., Filimonova M.V., Surinova V.I., Shitova A.A., Nikolaev K.A., Rybachuk V.A., Kosachenko A.O., Koryakin S.N., Shegay P.V., Ivanov S.A., Kaprin A.D., Filimonov A.S.** Radiomodifying properties of a bromo-substituted derivative of indole-3-carboxylic acid in proton and electron therapy of Ehrlich carcinoma *In vivo*. *Radiatsionnaya Gygiene = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 19–30. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-19-30

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-31-40

УДК: 614.876-055.26

Требования к обеспечению радиационной безопасности беременных женщин в ситуациях планируемого и аварийного облучения

Водоватов А.В.^{1,2}, Чипига Л.А.^{1,3,4}, Библин А.М.¹, Горский Г.А.^{1,5}, Лантух З.А.⁶, Солдатов И.В.⁶,
Вишнякова Н.М.^{1,5}

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

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», Москва, Россия

Воздействие ионизирующего излучения на беременных женщин способно приводить не только к увеличению вероятности развития стохастических эффектов как женщины, так и будущего ребенка, так и привести к развитию различных пороков развития у ребенка. При переработке нормативных правовых актов Роспотребнадзора в области обеспечения радиационной безопасности при медицинском и аварийном облучении, необходимо актуализировать требования по радиационной защите беременных, основывая их на современных научных эпидемиологических и радиобиологических данных. Цель данной работы – разработать требования к обеспечению радиационной защиты беременных для различных ситуаций облучения. Материалы и методы: Работа основана на систематическом анализе отечественных и международных регулирующих документов, регламентирующих обеспечение радиационной защиты у беременных при медицинском и аварийном облучении, а также содержащих результаты эпидемиологических исследований. Результаты исследования и обсуждение: Результаты анализа показывают, что воздействие ионизирующего излучения на плод или эмбрион ассоциировано с менее чем 2 % врожденных пороков развития, выявленных у новорожденных. В качестве порогового значения, ниже которого достоверно определить детерминированные эффекты, ассоциированные с воздействием ионизирующего излучения, невозможно, принимается 100 мГр поглощенной дозы в плоде (эмбрионе). Для обеспечения консервативного подхода к радиационной защите беременных в отечественной практике предложено установить граничную дозу для беременных женщин в 50 мГр поглощенной дозы в плоде (эмбрионе) за период с момента обнаружения беременности до родоразрешения для ситуаций оказания плановой медицинской помощи. Это позволит исключить развитие пороков развития у ребёнка и минимизировать вероятность возникновения радиационно-индуцированного рака после рождения. В качестве критерия отнесения к радиационной аварии предложено установить 500 мГр поглощенной дозы в плоде (эмбрионе). Заключение: Данный подход будет реализован в новой редакции Норм радиационной безопасности и Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности.

Ключевые слова: поглощенная доза, детерминированные эффекты, стохастические эффекты, беременные, радиационная защита, медицинское облучение.

Введение

В медицинской практике при обеспечении радиационной защиты пациентов приоритет уделяется устранению возникновения стохастических эффектов (развития радиационно-индуцированных раков) [1–4]. Диапазоны доз облучения при проведении процедур рентгеновской и ради-

нуклидной диагностики не подразумевают развития детерминированных эффектов даже в ситуациях избыточного и/или необоснованного облучения (переоблучения) пациентов. Возможность развития детерминированных эффектов существует только при проведении интервенционных исследований (лучевые поражения кожи) или процедур лучевой терапии (острые или хронические поражения любых радиочувствительных органов и тканей) [2, 3].

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

Особые подходы используются при обеспечении радиационной защиты беременных женщин, так как необходимо учитывать как возможность возникновения пороков развития будущего ребёнка, так и увеличение вероятности развития радиационно-индуцированных раков. В связи с этим для беременных женщин устанавливаются более жесткие требования по обеспечению их радиационной защиты, как правило основанные на ограничении доз облучения плода/эмбриона, или исключение (минимизацию) воздействия ионизирующего излучения на плод в отдельные периоды беременности [1–5].

Представленные в отечественных^{1,2} и международных регулирующих документах [1–5] подходы к ограничению облучения беременных являются чрезвычайно консервативными и не в полной мере отражают реальные последствия воздействия ионизирующего излучения (ИИ) на организм беременной женщины. Отдельной проблемой при обеспечении радиационной защиты беременных женщин является стигматизация ИИ, т.е. чрезмерное преувеличение негативных эффектов воздействия ИИ на плод и, как следствие, будущего ребёнка [6–10].

В рамках переработки отечественных нормативных правовых актов в области радиационной безопасности необходимо актуализировать требования к ограничению облучения беременных женщин в ситуациях планируемого и аварийного облучения.

Цель исследования – обоснование актуализированных подходов к обеспечению радиационной защиты беременных пациенток в ситуациях планируемого и аварийного облучения.

Материалы и методы

Работа была основана на анализе данных по различным патологиям, наблюдавшимся у беременных, и выявляемых

у новорожденных в течение первого года жизни, а также отечественных и международных требований по обеспечению радиационной защиты беременных в ситуациях планируемого и аварийного облучения. Для этого был выполнен поиск источников из рецензируемых научных журналов в сети PubMed по ключевым словам «radiation protection of pregnant» (радиационная защита беременных); «radiation risks during pregnancy» (радиационные риски при беременности); «pregnancy pathologies» (патологии при беременности); «newborn pathologies» (патологии новорожденных). Для анализа требований к обеспечению радиационной безопасности использовали регулирующие документы МАГАТЭ, МКРЗ, НКДАР ООН, а также отечественные санитарные правила и нормативы.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа литературы показали, что любая беременность сопровождается достаточно высоким фоновым риском для эмбриона и плода в связи с нарушениями репродуктивной функции и развития. Фоновый уровень врожденных пороков развития составляет ~3 % (т.е. при отсутствии радиационного воздействия примерно 3 из каждого 100 рожденных детей имеют выраженные врожденные пороки развития). Незначительные пороки развития, минимально сказывающиеся на здоровье, встречаются еще у ~4 % новорожденных. Прерывание беременности (самопроизвольный аборт, выкидыш) у женщин, которые знают, что они беременны, происходит при примерно 15 % беременностей. Более детальная информация о различных патологиях, возникающих во время беременности, представлена в таблице 1 [11].

Сведения о причинах развития различных патологий у новорожденных в течение первого года жизни представлены в таблице 2.

Таблица 1

Частоты возникновения различных патологий при беременности (адаптировано из [11])

[Table 1]

Frequencies of different types of pathologies in pregnancy (adapted from [11])

Тип патологии [Type of pathology]	Частота на 1000 беременностей [Frequency per 1000 pregnancies]
Иммунологически и клинически диагностированные самопроизвольные аборты (включая случаи, вызванные летальными пороками и хромосомными аномалиями до первого месяца беременности) [Immunologically and clinically diagnosed spontaneous abortions (including cases of lethal malformations or chromosome abnormalities that cause spontaneous abortion before the end of the first month of gestation)]	350
Клинически распознаваемые самопроизвольные аборты (после первой пропущенной менструации) [Clinically recognized spontaneous abortions (after the first missed menstrual period)]	150
Генетические заболевания — мультифакториальные или полигенные (взаимодействие генетики и окружающей среды) [Genetic diseases – multifactorial or polygenic]	90

¹ СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» [Sanitary Regulations and Standards “Hygienic requirements for the design and operation of X-ray machines and the conduct of X-ray examinations. SanPiN 2.6.1.1192-03”. (In Russ.)]

² Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 N 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09» (вместе с «НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы») (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 N 14534). [Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. (In Russ.)]

Окончание таблицы 1

Тип патологии [Type of pathology]	Частота на 1000 беременностей [Frequency per 1000 pregnancies]
Генетические заболевания — доминантно наследуемые [Genetic diseases – dominantly inherited]	10
Генетические заболевания — аутосомно-рецессивные и сцепленные с полом рецессивные заболевания [Genetic diseases - autosomal and sex-linked Mendelian recessive]	1,2
Генетические заболевания — хромосомные аномалии [Genetic diseases - chromosomal abnormalities]	5
Генетические заболевания — новые мутации в развивающихся яйцеклетках или сперматозоидах до зачатия [Genetic diseases - new mutations in the developing ova or sperm prior to conception]	3
Основные врожденные пороки развития (генетические, неизвестной этиологии, средовые) [Major malformations (genetic, unknown, environmental)]	30
Преждевременные роды [Prematurity]	69
Внутриутробная задержка роста [Fetal growth retardation]	30
Мертворождение (на сроке беременности >20 недель) [Stillbirths (>20 weeks)]	12
Бесплодие [Infertility]	7 % пар [pairs]

Таблица 2

Этиология врожденных пороков развития, выявленных в течение первого года жизни (адаптировано из [11])

[Table 2

Etiology of congenital malformations observed during the first year of life (adapted from [11])

Предполагаемая причина [Suspected cause]	Доля от общего числа случаев (%) [Percent of total, %]
Неизвестная причина (полигенные, мультифакториальные, спонтанные ошибки развития, синергизм тератогенов) [Unknown (polygenic, multifactorial, spontaneous errors of development, synergistic interactions of teratogens]	65
Генетическая (аутосомно- и сцепленные с полом менделевские заболевания, хромосомные аномалии, новые мутации) [Genetic (autosomal and sex-linked inherited Mendelian genetic disease, cytogenetic (chromosomal abnormalities), new mutations]	15 – 25
Воздействие окружающей среды (в целом) [Environmental]	10
Состояния матери (алкоголизм, диабет, эндокринные заболевания, фенилкетонурия, курение, голодание, дефицит питания) [Maternal conditions (alcoholism, diabetes, endocrinopathies, phenylketonuria, smoking and nicotine, starvation, nutritional deficits)]	4
Инфекционные агенты (краснуха, токсоплазмоз, сифилис, папилломавирус, цитомегалловирус, ветряная оспа, энцефалит, парвовирус B19) [Infectious agents: rubella, toxoplasmosis, syphilis, herpes simplex, cytomegalovirus, varicella-zoster, Venezuelan equine encephalitis, parvovirus B19]	3
Механические нарушения (деформации: амниотические перетяжки, сдавление пуповины, несоответствие размеров матки и ее содержимого) [Mechanical problems (deformations: amniotic band constrictions, umbilical cord constraint, disparity in uterine size and uterine contents)]	1 – 2
Химические агенты, лекарственные препараты, большие дозы ионизирующего излучения, гипертермия [Chemicals, prescription drugs, high-dose ionizing radiation, hyperthermia]	2

Как следует из таблиц 1 и 2, в популяции наблюдается высокий фоновый уровень развития различных патологий плода (эмбриона); достоверно определить при этом роль воздействия ИИ практически невозможно. У новорожденных лишь незначительная часть (2 %) патологий может быть ассоциирована с воздействием ИИ. Это еще раз подчеркивает преувеличение вклада ИИ в развитие патологий будущего ребенка.

В соответствии с современными научными представлениями о воздействии ИИ на беременных, облучение эмбриона в диапазоне поглощенных доз от 0,15 до 0,20 Гр на преддимплантационной и пресомитной стадиях может увеличить риск потери эмбриона [4, 11]. Однако повышение риска врожденных пороков развития или задержки роста у выживших эмбрионов при таких уровнях не наблюдается. Эти результаты

в основном получены в исследованиях на животных-млекопитающих и известны как «феномен «все или ничего»».

К детерминированным эффектам воздействия ИИ на плод относятся врожденные пороки развития, умственная отсталость, снижение коэффициента интеллекта (IQ), микроцефалия, нейроповеденческие эффекты, судорожные расстройства, замедление роста, задержка роста (роста и веса), а также эмбриональная и фетальная смерть (выкидыши, мертворождение). Возникновение таких эффектов обычно связано с гибелю клеток или серьезным нарушением клеточных функций во время важных этапов развития эмбриона или плода [4, 11]. В таблице 3 представлены различные негативные эффекты для эмбриона/плода для различных диапазонов поглощенных доз для различных сроков беременности [12].

Таблица 3

Негативные эффекты воздействия ионизирующего излучения на плод/эмбрион (адаптировано из [12])

Table 3

Negative effects of prenatal ionizing exposure (adopted from [12])

Диапазон поглощен- ной дозы в плоде (эмбрионе), мГр [Absorbed dose in the fetus (embryo), mGy]	Время после зачатия [Time post conception]				
	До 2 недели [up to 2 weeks]	С 3 по 5 неделю [3 rd to 5 th week]	С 6 по 13 неделю [6 th to 13 th week]	С 14 по 23 неделю [14 th to 23 rd week]	С 24 недели до родов [24 th week to term]
До 100 мГр [< 100 mGy]	Детерминированные эффекты обнаружить невозможно [Deterministic effects non-detectable]				
100–500 мГр [100–500 mGy]	Увеличение риска нарушения имплан- тации эмбриона. При успешной имплантации нега- тивные эффекты отсутствуют [Increase in the risk of failure to implant. Surviving embryos will probably have no significant (non-cancer) health effects]	Возможны нарушения роста у ребенка [Growth restriction possible]	Возможны нарушения роста у ребенка [Growth restriction possible]	Развитие детерминированных эффектов маловероятно [Deterministic effects are unlikely]	
Более 500 мГр [> 500 mGy]	Высокий риск нару- шения имплантации эмбриона. При успешной им- плантации негатив- ные эффекты отсутствуют [Failure to implant will likely be high, depending on dose, but surviving embryos will probably have no significant (non-cancer) health effects]	Вероятность выкидыша Вероятность значи- мых дефектов разви- тия (неврологические нарушения, про- блемы с моторикой) Высокая вероятность нарушений роста [Probability of miscar- riage may increase. Probability of major malformations, such as neurological and motor deficiencies, increases. Growth restriction is likely]	Увеличение веро- ятности выкидыша Высокая вероят- ность нарушений роста [Probability of mis- carriage may in- crease. Growth restriction is likely.]	Увеличение вероятности выкидыша Высокая вероятность нарушений роста [Probability of mis- carriage may in- crease. High probability of growth restriction]	Вероятность выкидыша и мертворождения [Miscarriage and neonatal death may occur]

Следует отметить, что в отличие от механизмов воздействия низких доз ИИ на организм обычного человека, которые достаточно хорошо изучены путём наблюдения за когортами пострадавших при применении ядерного оружия в Хиросиме и Нагасаки, жителей территорий, пострадавших после аварии на комбинате Маяк и Чернобыльской АЭС [13–16], воздействие ИИ на эмбрион (плод) изучено недостаточно. Все современные представления о воздействии ИИ на плод являются консервативными и получены, в первую очередь, в результате экспериментов на животных [4, 11, 13–16]. Проведение биомедицинских исследований, направленных на оценку последствий воздействия ИИ на беременных, ограничено Хельсинской декларацией и принципами биоэтики.

Также нужно помнить, что представления о радиочувствительности отдельных органов и тканей человека могут существенно меняться по мере появления новых научных данных. Так, до 2007 года подразумевалось, что человеческие гонады обладают очень высокой радиочувствительностью. По результатам анализа эпидемиологических данных был сделан вывод о низкой радиочувствительности гонад, и практически полном отсутствии возможных наследственных эффектов в популяции за счёт воздействия ИИ [17].

Несмотря на то, что наличие прямой связи между дозой облучения плода/эмбриона и развитием негативных (детерминированных) эффектов достоверно для людей не подтверждено, консервативным подходом к обеспечению радиационной защиты беременных женщин является ограничение поглощенной дозы в плоде/эмбрионе 100 мГр за период с момента обнаружения беременности до родов [4, 9, 11]. В таком случае вероятность развития детерминированных эффектов будет находиться ниже уровня фонового возникновения таких эффектов в популяции, что считается приемлемым. Проведение прямой корреляции между воздействием ИИ на беременную женщину и возникновением патологии у плода (новорожденного) чрезвычайно затруднительно.

Современные чрезвычайно консервативные подходы к обеспечению радиационной защиты беременных женщин при проведении диагностических рентгеновских процедур, как правило, основаны на преувеличении потенциального вреда от ИИ. Такие консервативные подходы распространены не только в Российской Федерации, но и в зарубежных странах. В частности, подразумевается, что при превышении определенной пороговой дозы в плоде он подвергается неприемлемому ущербу с точки зрения реализации детерминированных эффектов и увеличения риска развития стохастических эффектов [6–11].

Следует отметить, что подходы к ограничению облучения беременных отличаются в зависимости от ситуации облучения. В ситуациях планируемого облучения работников эмбрион или плод рассматриваются в качестве лица из категории населения, эффективная доза для которого не должна превышать соответствующий предел дозы [1, 5]. В ситуациях медицинского облучения пациентов прямые ограничения доз облучения не устанавливаются [2–4]. В ситуациях аварийного облучения в качестве критерия принятия решения выступает прогнозируемая или полученная эквивалентная доза в плоде за определенный временной период [1, 18]. Сводная информация о различных подходах к ограничению облучения беременных женщин для различных ситуаций облучения представлена в таблице 4.

Как следует из данных, представленных в таблице 4, в отечественных документах представлены самые жесткие требования по обеспечению радиационной защиты беременных: полный запрет на работу с источниками ИИ в период беременности; наличие ограничений доз медицинского облучения. При этом уровни вмешательства при аварийном облучении определены для периода в 2 суток (а не всего периода внутриутробного развития).

Наиболее спорным и проблематичным является обеспечение радиационной защиты беременных женщин в ситуациях медицинского облучения. Преувеличение потенциальной опасности от диагностического медицинского облучения беременных перекрывает основной принцип лечения патологий у беременных: сначала спасаем мать, а потом ребёнка. При этом неприемлемым подразумевается любое диагностическое облучение вне зависимости от диапазона доз облучения и локализации анатомической области исследования: компьютерная томография органов брюшной полости и малого таза для врача-специалиста субъективно эквивалентна по опасности проведению стоматологического исследования или флюорографии органов грудной клетки. Отдельным вопросом является проведение исследований беременных женщин по жизненным показаниям, например, при возникновении тромбоэмболии легочной артерии (ТЭЛА), или при отслойке плаценты. В таком случае риск смерти или существенного ухудшения здоровья пациентки, а также возможного прерывания беременности, многократно превышают риск развития негативных эффектов от воздействия ИИ. При проведении рентгенорадиологических процедур по жизненным показаниям ориентироваться на радиационный риск (и, как следствие, на ограничения доз) нецелесообразно. В этой ситуации все негативные эффекты будут реализовываться спустя длительное время после рождения ребёнка (например, латентный период для большинства радиационно-индукционных раков составляет 10–15 лет) [17]. При непроведении таких исследований по жизненным показаниям этим негативным эффектам будет не у кого реализовываться [7, 11].

Основным вопросом при обеспечении радиационной защиты беременной женщины является последовательность действий при превышении ограничения дозы облучения плода в 100 мГр (мЗв). Исторически как отечественные¹, так и международные подходы рекомендовали в таких случаях прерывание беременности [19]. При этом какая-либо доказательная база для таких рекомендаций не существует. На текущий момент общепринятым международном подходом является установление в качестве максимально допустимой дозы облучения плода уровень в 100 мГр (500 мГр в США) поглощённой дозы в плоде [4, 7, 11]. Однако международные и национальные регулирующие документы при превышении данного уровня предусматривают исключительно информирование беременной женщины или ее законных представителей. Дальнейшие решения по сохранению или прерыванию беременности в регулирующих документах никак не определяются; сам уровень в 100 (500) мГр поглощенной дозы не является критерием принятия решения или граничной дозой.

Внедрение данных подходов в отечественное законодательство затруднено за счет следующих факторов:

- отсутствие полноценного научного обоснования представленных ограничений доз. Основным предпосылкой системы радиационной защиты является гарантированное

Таблица 4

/Table 4

Подходы к ограничению облучения беременных женщин для различных ситуаций облучения**Dose constraints for the pregnant women for different exposure situations**

Источник [Source]	Ситуация облучения и группа лиц [Exposure situation and public group]			Аварийное облучение [Emergency exposure]				
	Работники [Workers]		Пациенты [Patients]		Население [Public]			
Дозовая величина [Dose unit]	Численное значение [Value]	Период [Period]	Дозовая величина [Dose unit]	Численное значение [Value]	Период [Period]	Дозовая величина [Dose unit]	Численное значение [Value]	Период [Period]
Регулирующие документы МАГАТЭ [1, 18] [IAEA regulations]	Эффективная доза [Effective dose]	1 мЗв [1 mSv]	С момента обнаружения беременности до родоразрешения [From the beginning of pregnancy to term]	Численных критерии не определено [No numerical values have been established]	—	Эквивалентная доза [Equivalent dose]	100 мЗв [100 mSv]	Весь период внутри-урбano-ga развития [Whole period of pregnancy]
Европейский союз ¹ [European union]	Эффективная доза [Effective dose]	1 мЗв [1 mSv]	С момента обнаружения беременности до родоразрешения [From the beginning of pregnancy to term]	Численных критерии не определено [No numerical values have been established]	—	—	—	—
НКРЗ США ¹ [NCRP USA]	Эффективная доза [Effective dose]	5 мЗв [5 mSv]	С момента обнаружения беременности до родоразрешения [From the beginning of pregnancy to term]	Численных критерии не определено [No numerical values have been established]	—	—	—	—
Российская Федерация ² [Russian Federation]	Работа с источниками ИИ в период беременности не допускается [No activities with sources of ionizing exposure for pregnant women are allowed]	—	Эффективная доза [Effective dose]	1 мЗв [1 mSv]	2 месяца [2 months]	Весь период внутри-урбano-ga развития [Whole period of pregnancy]	Поглощенная доза [Absorbed dose]	100 мГр [100 mGy]

¹COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013L0059> Онлайн-ресурс [Дата обращения 21.11.2025] [COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013L0059> Online edition. Available from: [https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/full-textOnline resource. \(Accessed November 21, 2025\) \[Accessed November 21, 2025\]\]](https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/full-textOnline resource. (Accessed November 21, 2025) [Accessed November 21, 2025]])

²Standards for Protection Against Radiation. URL: [https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/full-textOnline resource. \(Accessed November 21, 2025\) \[Accessed November 21, 2025\]\]](https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/full-textOnline resource. (Accessed November 21, 2025) [Accessed November 21, 2025]])

отсутствие тех или иных негативных эффектов воздействия ИИ. Стопроцентную гарантию отсутствия развития негативных эффектов соблюдение данных ограничений доз обеспечить не может из-за индивидуальной радиочувствительности организма человека и комплексного воздействия прочих негативных факторов в период беременности;

– сам факт возможного облучения беременных вводит в когнитивный диссонанс медицинских специалистов из-за преувеличения потенциальной и реальной опасности воздействия ИИ на организм беременной женщины. Осознанное облучение беременной женщины (даже по жизненным показаниям) для большинства специалистов является субъективно неприемлемым;

– все международные организации крайне деликатно обходят вопрос ограничения доз облучения у беременных женщин, и не готовы выступить с обоснованием того или иного уровня ограничения дозы. Во всех рекомендациях, стандартах и принципах хорошей клинической практики используются ссылки на публикации МКРЗ (имеющие справочно-рекомендательный характер), но конкретное решение об оценке допустимости или недопустимости того или иного облучения принимает специалист. Современные международные подходы к обеспечению радиационной защиты беременных женщин существенно отличаются от привычной практики, существовавшей более чем 20 лет в парадигме отечественной радиационной защиты;

– используемые ограничения доз существенно отличаются от ограниченных доз, предъявляемых к облучению беременных женщин, работающих с источниками ИИ. Так, в соответствии с регулирующими документами МАГАТЭ [1, 5], беременной женщине, работающей с источниками ИИ, должна быть обеспечена такая же радиационная защита, как для лиц из категории населения. Эффективная доза у плода не должна превысить 1 мЗв с момента обнаружения беременности до родоразрешения. Таким образом, подходы к диагностическому облучению беременных позволяют облучать их в дозе, на два порядка превышающие допустимые ограничения доз для работающих с источниками ИИ. Также критерий в 100 мГр поглощенной дозы в плоде (эмбрионе) используется для ситуаций аварийного облучения. Это субъективно затрудняет использование данного критерия для ситуаций планируемого облучения; он воспринимается как чрезвычайно мягкий.

Для решения практической задачи обеспечения радиационной защиты беременных женщин при медицинском облучении в рамках переработки НРБ 99/2009 целесообразно:

– установить граничную дозу для беременных женщин в 50 мГр поглощенной дозы в плоде (эмбрионе) за период с момента обнаружения беременности до родоразрешения для проведения диагностических рентгенорадиологических процедур в рамках оказания плановой медицинской помощи. Выбор данного значения основан на пороговой дозе для развития возможных пороков развития плода с коэффициентом запаса 2. Это позволит исключить развитие пороков развития у ребёнка и минимизировать вероятность возникновения радиационно-индукционного рака после рождения. Данное ограничение позволяет провести весь необходимый спектр рентгеновских процедур, необходимых при нормальном течении беременности, например, несколько флюорографий, и/или рентгеностоматологических исследований. Данная граничная доза не распространяется на ситуации оказания неотложной или экстренной медицинской помощи (где приоритетом является устранение жизнеугрожающей ситуации), при которых риск развития радиационно-индукционных эффектов у плода отходит на второй план. Установление граничной дозы для медицинского облучения беременных женщин является чрезвычайно консервативным подходом и не имеет аналогов в международной практике;

– независимо от характера оказания медицинской помощи поглощенная доза в плоде (эмбрионе) должна определяться и регистрироваться при проведении каждой рентгенорадиологической процедуры. При этом необходимо учитывать как поглощенную дозу за процедуру, так и накопленную дозу, например, у беременной женщины, проходящей рентгеновские процедуры в различных медицинских организациях (или в одной, но неоднократно). Без учёта такой информации радиационную защиту беременной пациентки обеспечить в должном объеме невозможно;

– информация об ожидаемой и полученной поглощенной дозе в плоде должны представляться беременной женщине и ее законным представителям в рамках процесса обоснования назначения рентгенорадиологической процедуры;

– в качестве критерия аварийного медицинского облучения беременной женщины установить 500 мГр поглощенной дозы в плоде (эмбрионе), соответствующим порогу развития жизнеугрожающих детерминированных эффектов (табл. 3). При этом для принятия управлеченческих решений в ситуациях аварийного облучения целесообразно сохранить использующийся в международной практике критерий в 100 мГр.

Заключение

Вопросы обеспечения радиационной защиты беременных женщин в различных ситуациях облучения являются чрезвычайно сложными из-за большого количества этических проблем, главным образом – из-за преувеличения последствий воздействия ионизирующего излучения на плод (эмбрион). Показано, что лишь незначительная часть патологий новорожденных может быть ассоциирована с воздействием ионизирующего излучения, а существующие подходы к ограничению облучения беременных являются консервативными и при их соблюдении позволяют избежать развития таковых патологий. Для обеспечения возможности проводить рентгенорадиологические процедуры беременным в плановом порядке целесообразно установить граничную дозу, основанную на пороге выявления детерминированных эффектов в плоде (эмбрионе) с коэффициентом запаса 2, проводить обязательную регистрацию, контроль и учет поглощенных доз, полученных за период беременности за счет медицинского облучения, а также установить критерий аварийного медицинского облучения. При этом защитные меры для ситуаций планируемого и аварийного облучения (не связанных с применением медицинских источников ИИ), используемые в отечественной практике, целесообразно оставить без изменений в связи с их достаточным консерватизмом.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Водоватов А.В. – научное руководство исследованием, определение цели, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, обработка и анализ полученных результатов, написание текста.

Чипига Л.А. – поиск и анализ литературы, анализ и интерпретация результатов, редактирование текста статьи.

Библин А.М. – анализ результатов.

Горский Г.А. – анализ результатов.

Лантух З.А. – разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Солдатов И.В. – поиск и анализ литературы, описание материалов и методов, перевод.

Вишнякова Н.М. – анализ результатов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Авторы заявляют об отсутствии источника финансирования.

Литература

1. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna, 2014. 518 p.
2. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA: Vienna, 2018. 340 p.
3. ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. Russian translation under M. Balonov. Saint-Petersburg: NIIRG, 2011. 66 p. (In Russian).
4. ICRP Publication 84. Pregnancy and Medical Radiation // Annals of the ICRP. 2000. Vol. 30, No 1. 62 p.
5. IAEA Safety Standards Series. No. GSG - 7. Occupational Radiation Protection: IAEA, Vienna, 2018. 336 p.
6. Saada M., Sanchez-Jimenez E., Roguin A. Risk of ionizing radiation in pregnancy: just a myth or a real concern? // Europace. 2023. Vol. 25, No 2. P. 270-276. DOI: 10.1093/europace/euc158. PMID: 36125209; PMCID: PMC10103573.
7. Almohammed H.I., Elshami W., Hamd Z.Y. et al. Enhancing radiation safety awareness and practices among female radiographers: a comprehensive approach // BMC Health Services Research. 2024. Vol. 24, No 931. DOI: 10.1186/s12913-024-11369-2.
8. Seven M., Yigin A.K., Agirbasli D., et al. Radiation exposure in pregnancy: outcomes, perceptions and teratological counseling in Turkish women // Annals of Saudi Medicine. 2022. Vol. 42, No 3. P. 214-221. DOI: 10.5144/0256-4947.2022.03.03.1200. Epub 2022 Jun 2. PMID: 35229664; PMCID: PMC9167462.
9. Committee Opinion No. 723: Guidelines for Diagnostic Imaging During Pregnancy and Lactation // Obstetrics & Gynecology. 2017. Vol. 130, No 4. P. e210-e216. DOI: 10.1097/AOG.0000000000002355. Erratum in: Obstetrics & Gynecology. 2018. Vol. 132, No 3. P. 786. DOI: 10.1097/AOG.0000000000002858. PMID: 28937575.
10. Brent R.L. Saving lives and changing family histories: appropriate counseling of pregnant women and men and women of reproductive age, concerning the risk of diagnostic radiation exposures during and before pregnancy // American Journal of Obstetrics & Gynecology. 2009. Vol. 200, No 1. P. 4-24. DOI: 10.1016/j.ajog.2008.06.032. PMID: 19121655.
11. NCRP Report No. 174. Preconception and Prenatal Radiation Exposure: Health Effects and Protective Guidance. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, 2013. 371 p.
12. Radiation and Pregnancy: Information for Clinicians. Онлайн-репсурс. URL: <https://www.cdc.gov/radiation-emergencies/hcp/clinical-guidance/pregnancy.html> (Дата обращения: 28.10.2025).
13. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the general assembly, with scientific annexes Annex J Exposures and effects of the Chernobyl accident. United Nations, New-York, 2000. 566 p.
14. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 1977 report to the general assembly, with scientific annexes Annex I Developmental effects of irradiation in utero (New York, United Nations). United Nations, New-York, 1977. 725 p.
15. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2008 report to the general assembly, with scientific annexes Annex C, Radiation exposures in accidents. United Nations, New-York, 2008. 313 p.
16. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Volume I. Annex A "Medical exposure to ionizing radiation" United Nations, New-York, 2008. 344 p.
17. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English / edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow: «Alana», 2009. 312 p. (In Russian).
18. International Atomic Energy Agency. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, GSR Part 7. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015.
19. Steive F.E. Strahlenbedingte teratogene Wirkungen und Schwangerschaftsabbruch [Radiation-induced teratogen effects and therapeutic abortion (author's transl)] // Rontgenblatter. 1976. Vol. 29, No 10. P. 465-482. (In German). PMID: 981896.

Поступила: 29.10.2025

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

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0001-9153-3061

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

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

ORCID: 0000-0001-7310-9718

Лантух Зоя Александровна – начальник отдела дозиметрического контроля и медицинской физики, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-6623-9610

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

ORCID: 0000-0002-4867-0746

Вишнякова Надежда Михайловна – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; профессор, кафедра коммунальной гигиены, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0001-7165-4923

Для цитирования: Водоватов А.В., Чипига Л.А., Библин А.М., Горский Г.А., Лантух З.А., Солдатов И.В., Вишнякова Н.М. Требования к обеспечению радиационной безопасности беременных женщин в ситуациях планируемого и аварийного облучения // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 31–40. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-31-40

Requirements for radiation protection of pregnant women in planned and emergency exposure situations

Aleksandr V. Vodovatov^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Artem M. Biblin¹, Grigory A. Gorsky^{1,5}, Zoya A. Lantukh⁶, Ilya V. Soldatov⁶, Nadezhda M. Vishnyakova^{1,5}

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

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

³ A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

⁴ Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

⁵ I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint Petersburg, Russia

⁶ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

Radiation exposure of pregnant women can not only increase the likelihood of stochastic effects for both the mother and the unborn child, but lead to the development of various birth defects as well. Revision of Rosпотребнадзора's regulations on radiation protection from medical and emergency exposure requires updating requirements for radiation protection of pregnant women. They should be based on modern scientific epidemiological and radiobiological data. The aim of this study was to develop requirements for radiation protection for pregnant women in various exposure situations. Materials and Methods: This study was based on a systematic review of Russian and international regulatory documents governing radiation protection for pregnant women during medical and emergency exposure, as well as epidemiological studies. Results and Discussion: The results of the analysis indicated that exposure of the fetus or embryo to ionizing radiation is associated with less than 2 % of congenital malformations identified in newborns. A threshold value of 100 mGy of absorbed dose in the fetus (embryo) is accepted as the threshold below which it is impossible to reliably determine deterministic effects associated with exposure to ionizing radiation. To ensure a conservative approach to radiation protection of pregnant women in Russian practice, it has been proposed to establish a dose constraint for pregnant women of 50 mGy of absorbed dose in the fetus (embryo) for the period from the moment of detection of pregnancy until delivery for situations involving routine medical care. Conclusion: This will prevent the development of malformations in the child and minimize the likelihood of radiation-induced cancer after birth. A value of 500 mGy of absorbed dose in the fetus (embryo) has been proposed as the criterion for radiation accidents. This approach will be implemented in the new edition of the Norms of Radiation Safety and the Basic Sanitary Rules for Radiation Safety.

Key words: absorbed dose, deterministic effects, stochastic effects, pregnant women, radiation protection, medical exposure.

Authors' personal contribution

Vodovatov A.V. – scientific management of the study, determination of the aim of the study, development of the study design, formulation of the scientific conjectures, processing, and analysis of results, writing the text of the article.

Chipiga L.A. – search and analysis of literature, analysis and interpretation of the results, editing the text of the article.

Biblin A.M. – analysis of the results.

Gorsky G.A. – analysis of the results.

Lantukh Z.A. – development of the study design, analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Soldatov I.V. – search and analysis of literature, description of materials and methods, translation.

Vishnyakova N.M. – analysis of the results.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The authors declare no sources of funding.

References

1. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna; 2014. 518 p.
2. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA: Vienna; 2018. 340 p.

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

3. ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. Russian translation under M. Balonov. Saint-Petersburg: NIIRG; 2011. 66 p. (In Russian).
4. ICRP Publication 84. Pregnancy and Medical Radiation. *Annals of the ICRP*. 2000;30(1): 62.
5. IAEA Safety Standards Series. No. GSG - 7. Occupational Radiation Protection: IAEA, Vienna; 2018. 336 p.
6. Saada M, Sanchez-Jimenez E, Roguin A. Risk of ionizing radiation in pregnancy: just a myth or a real concern? *Europace*. 2023;25(2): 270-276. DOI: 10.1093/europace/euac158. PMID: 36125209; PMCID: PMC10103573.
7. Almohammed HI, Elshami W, Hamd ZY, Abuzaid MM. Enhancing radiation safety awareness and practices among female radiographers: a comprehensive approach. *BMC Health Services Research*. 2024;24(931). DOI: 10.1186/s12913-024-11369-2.
8. Seven M, Yigin AK, Agirbasli D, Alay MT, Kirbiyik F, Demir M. Radiation exposure in pregnancy: outcomes, perceptions and teratological counseling in Turkish women. *Annals of Saudi Medicine*. 2022;42(3): 214-221. DOI: 10.5144/0256-4947.2022.03.03.1200. Epub 2022 Jun 2. PMID: 35229664; PMCID: PMC9167462.
9. Committee Opinion No. 723: Guidelines for Diagnostic Imaging During Pregnancy and Lactation. *Obstetrics & Gynecology*. 2017;130(4): e210-e216. DOI: 10.1097/AOG.0000000000002355. Erratum in: *Obstetrics & Gynecology*. 2018. Vol. 132, No 3. P. 786. DOI: 10.1097/AOG.0000000000002858. PMID: 28937575.
10. Brent RL. Saving lives and changing family histories: appropriate counseling of pregnant women and men and women of reproductive age, concerning the risk of diagnostic radiation exposures during and before pregnancy. *American Journal of Obstetrics & Gynecology*. 2009;200(1): 4-24. DOI: 10.1016/j.ajog.2008.06.032. PMID: 19121655.
11. NCRP Report No. 174. Preconception and Prenatal Radiation Exposure: Health Effects and Protective Guidance. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda; 2013. 371 p.
12. Radiation and Pregnancy: Information for Clinicians. Online resource. Available from: <https://www.cdc.gov/radiation-emergencies/hcp/clinical-guidance/pregnancy.html> (Accessed October 28, 2025).
13. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the general assembly, with scientific annexes Annex J Exposures and effects of the Chernobyl accident. United Nations, New-York; 2000. 566 p.
14. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 1977 report to the general assembly, with scientific annexes Annex I Developmental effects of irradiation in utero (New York, United Nations). United Nations, New-York; 1977. 725 p.
15. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2008 report to the general assembly, with scientific annexes Annex C, Radiation exposures in accidents. United Nations, New-York; 2008. 313 p.
16. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Volume I. Annex A "Medical exposure to ionizing radiation" United Nations, New-York; 2020. 344 p.
17. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English / edited by MF Kiselev, NK Shandala. Moscow: «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian).
18. International Atomic Energy Agency. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, GSR Part 7. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2015.
19. Stieve FE. Strahlenbedingte teratogene Wirkungen und Schwangerschaftsabbruch [Radiation-induced teratogen effects and therapeutic abortion (author's transl)]. *Rontgenblatter*. 1976;29(1): 465-482. (In German). PMID: 981896.

Received: October 29, 2025

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., Sain Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)
ORCID: 0000-0002-5191-7535

Larisa A. Chipiga – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Research Fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; Docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0001-9153-3061

Artem M. Biblin – Senior Research fellow, Head of Information-analytical center, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0002-3139-2479

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

Zoya A. Lantukh – Head of the Department of Dosimetry and Medical Physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0001-6623-9610

Ilya V. Soldatov – Head of Laboratory, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-4867-0746

Nadezhda M. Vishnyakova – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing; Professor of the Department of Hygiene of the conditions of education, training, labor and radiation hygiene of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0001-7165-4923

For citation: Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Biblin A.M., Gorsky G.A., Lantukh Z.A., Soldatov I.V. , Vishnyakova N.M. Requirements for radiation protection of pregnant women in planned and emergency exposure situations. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 31–40. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-31-40

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-41-48

УДК: 613.84:614.876:616-006(470.55)

Половозрастная модель интенсивности курения населения, облученного на Южном Урале

Ахмадуллин Р.М.¹, Шишкина Е.А.^{1,2}, Крестинина Л.Ю.²

¹ Челябинский государственный университет, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Челябинск, Россия

² Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

Изучение вероятности и интенсивности курения в Уральском регионе выполнялось для последующего анализа совместного влияния курения и радиации на риск возникновения рака лёгкого. Введено понятие дозы курения — меры, соответствующей количеству сигарет в день, выкуриваемых условным членом когорты определённого пола и возраста (произведение вероятности курения в когорте на среднюю интенсивность курения). Цель исследования — разработка половозрастной модели дозы курения. Материалы и методы: Использован регистр информации о курении (48 694 записи для 24 587 жителей Уральского региона 1889–1997 годов рождения). К курильщикам относили лиц, которые когда-либо курили. Использовались методы теории вероятностей, анализ распределений и регрессионный анализ. Результаты исследования и обсуждение: Интенсивность курения среди курящих до 40 лет возрастает, а затем становится постоянной и равной 17,5 и 10 сигаретам в день у мужчин и женщин соответственно. Вероятность курения увеличивается с возрастом до 30 лет, а затем снижается. Вероятность курения мужчин старше 18 лет превышает 40 %. Для женщин вероятность курения в любом возрасте — не более 5 %. Для условных мужчины и женщины в возрасте 35 лет доза курения равна 12,2 и 0,3 сигареты в день соответственно. Сформулирован алгоритм присвоения дозы курения для анализа эффектов в Уральской когорте аварийно-облучённого населения. Однако следует с осторожностью экстраполировать полученные результаты на другие территории и поколения. Заключение: Предложенный метод присвоения дозы курения может применяться в других эпидемиологических когортах при недостаточном количестве индивидуальных данных о курении. В дальнейшем планируется оценить неопределенность модели и ее влияние на совместный анализ радиационных и нерадиационных рисков.

Ключевые слова: курение, интенсивность курения, вероятность курения, доза курения, рак лёгкого, алгоритм учёта фактора курения.

Введение

Одно из ведущих мест в структуре онкопатологий, наблюдающихся в Российской Федерации, занимают новообразования бронхолегочной системы [1]. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), рак легких дает самую высокую смертность при злокачественных новообразованиях, унося примерно 1,6 миллионов жизней в год на планете, а общая пятилетняя выживаемость составляет всего 15 % [2, 3]. Причиной, повышающей вероятность возникновения онкопатологий, является воздействие ионизирующего излучения (ИИ). Эпидемиологические исследования показали, что однократное воздействие высоких доз неизменно связано со значительно повышенным риском рака лёгких [4]. Для малых и средних доз внешнего и внутреннего облучения вопрос рисков возникновения рака лёгких в разных исследованиях остается противоречивым или сохраняет достаточные неопределённости [5, 6], в том числе при сценариях хронического облучения населения, проживающего на территориях, загрязненных бета- и гамма-излучателями. На риск формирования онкопатологии лёгких также могут влиять факторы нерадиационной природы: пол, воз-

раст и вредные привычки. В частности, по данным ВОЗ, курение ассоциируется с примерно 85 % случаев рака лёгкого [7]. Поэтому исследования радиационных рисков и, особенно, рисков формирования онкопатологии лёгких должны учитывать половозрастные особенности курения [8–10].

Изучение рисков развития рака лёгкого при малых и средних дозах и малых мощностях доз ионизирующего излучения проводится в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) ФМБА России. Для анализа радиационных эффектов создана Уральская когорта аварийно-облучённого населения (УКАОН) [11]. В ней включены лица, облучённые в результате радиационных ситуаций на Южном Урале: сброс жидких радиоактивных отходов в реку Течу ПО «Маяк» 1949–1956 гг.; взрыв хранилища радиоактивных отходов ПО «Маяк» 29.09.1957 г., образовавший Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) [12–14]. Численность УКАОН ~ 63 тысяча человек, а период наблюдения за членами когорты составляет около 70 лет. Также сотрудниками эпидемиологической лаборатории УНПЦ РМ ФМБА России собран регистр информации о курении для населения, проживавшего на территории наблюдения. Однако собранная информация охватывает только примерно 30% чле-

Ахмадуллин Роман Марселевич

Челябинский государственный университет

Адрес для переписки: 454001, Россия, Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129; E-mail: rommrr3102@bk.ru

нов УКАОН. Поскольку в регистр входят сельские жители Южного Урала, сопоставимые с членами УКАОН по возрасту, национальному составу, периоду проживания, социальным условиям и семейным традициям, то результаты анализа половозрастных особенностей курения можно распространить на остальные 70 % членов УКАОН. Таким образом, встал задача создать модель вероятности и интенсивности курения среднестатистического члена когорты. При разработке модели мы ввели понятие дозы курения – меры воздействия, соответствующей среднему количеству сигарет в день для условного члена когорты определённого пола и возраста.

Цель исследования – разработка половозрастной модели дозы курения членов УКАОН. Для достижения поставленной цели были проанализированы вероятность и интенсивность курения людей разного пола и возраста на основе данных регистра курения и рассчитана доза курения.

Материалы и методы

Регистр курения

Использован регистр информации о курении для лиц, проживавших на территории наблюдения. Регистр составлен

на основе данных опроса пациентов клиники УНПЦ РМ и анкетирований, проводившихся с 1952 по 2023 гг. Он содержит 48 694 записи для 24 587 человек 1889–1997 годов рождения. Причем 80 % из них соответствует относительно узкому (35-летнему) диапазону годов рождения с 1927 по 1962 гг. Часть людей опрашивались несколько раз в разные годы, поэтому количество записей больше, чем количество человек.

Для каждого человека содержатся следующие данные: дата рождения, пол, национальность, статус курения (курит/не курит), год начала курения, год окончания курения, интенсивность курения (число выкуренных сигарет в день), дата анкетирования, источник информации (лично или со слов родственников). Так как анкетирование, проводившееся в разные годы разными исследователями, не было стандартизованным, то не у всех курильщиков есть дополнительная информация об интенсивности и стаже курения.

У части людей есть информация о различной интенсивности курения в разные периоды жизни. В таблице 1 представлена общая характеристика регистра курения и отдельно выборки тех, кто имеет статус курильщика.

Статистические характеристики регистра курения и выборки курильщиков

Таблица 1

[Table 1]

Summary statistics of the smoking register and the sample of smokers]

Параметр [Parameter]	Мужчины [Male]	Женщины [Female]	Славяне [Slavs]	Тюркиты [Turkites]	Всего [Total]
Количество людей [Number of people]	10 006	14 581	14 334	10 253	24 587
Доля в регистре, % [Register fraction, %]	41	59	58	42	100
Курящие [Smokers]	7 156	888	4 794	3 250	8 044
Доля курящих, % [Smoker fraction, %]	89	11	60	40	100

Показатели курения

Вероятность курения $P_{sex}(T)$ для лиц определенного пола (sex) и возраста (T) определялась как отношение количества курильщиков к общему количеству людей того же пола и возраста. Средняя интенсивность курения $I_{sex}(T)$, как функция от возраста, определялась сглаживанием возрастных зависимостей интенсивности курения отдельно для мужчин и женщин в приближении сigmoidальной кривой роста.

Средняя доза курения $D_{sex}(T)$ для определённого возраста (T) и пола (sex) находится произведением вероятности курения $P_{sex}(T)$ на среднюю интенсивность курения $I_{sex}(T)$:

$$D_{sex}(T) = I_{sex}(T) \cdot P_{sex}(T) \quad (1)$$

Формирование групп курильщиков для анализа интенсивности курения

К курильщикам относили лиц, о которых имелись сведения, что они когда-либо курили. Для анализа интенсивности курения были выбраны лица, имевшие статус курильщика с известной интенсивностью и сроками курения. Если информация о сроках курения отсутствовала и не было данных повторных опросов, учитывалось только курение в год

опроса. Для 34 % (около 2 000 человек) имелись данные повторных анкетирований, проводимых в разные годы. Повторные данные позволили оценить надежность полученной информации. У повторных записей, источником которых были показания родственников, расхождения с информацией от самих курильщиков наблюдались в более 15 % случаев. Повторные записи на основе личных свидетельств в 95 % случаев совпадали. Поэтому информация от родственников в дальнейший анализ не включалась. Если имелись расхождения в возрасте начала курения, дата начала принималась по более раннему анкетированию; при расхождении информации о прерывании курения – по дате ближайшего по времени анкетирования. После цензурирования данных количество людей, включенных в анализ вероятности курения, стало равным 22 124. Выборка курящих сократилась до 7 269 человек (12 870 записей). В таблице 2 представлена характеристика цензурированной выборки курильщиков. При этом распределение цензурированных данных по полу и национальности (табл. 1) не изменилось. Как видно из таблицы 2, более 75 % записей, относящихся к курильщикам, имеют информацию не только о статусе, но и об интенсивности курения.

Описание цензурированных данных регистра курения и выборки курильщиков

Table 2

Summary of censored data of smoking register and the sample of smokers]

Параметр [Parameter]	Регистр курения [Smoking register]		Выборка курильщиков [Sample of smokers]	
	Мужчины [Male]	Женщины [Female]	Мужчины [Male]	Женщины [Female]
Средний возраст на момент анкетирования \pm стандартное отклонение, лет [Average age at the time of survey \pm standard deviation, years]	45 \pm 18	47 \pm 19	48 \pm 15	45 \pm 14
Максимальный возраст на момент анкетирования, лет [Maximum age at time of survey, years]	93	96	91	81
Имеется информация об интенсивности курения [Available information on smoking intensity]				
% людей [% of people]		23,1		78,3
% записей [% of records]		20,1		76,1
Повторные данные анкетирований об интенсивности курения, % людей [Repeated survey data on smoking intensity, % of people]	8	15,2	27	51,4

Доля курящих мужчин на порядок больше доли курящих женщин ($71,5\% > 6,1\%$), а доля курящих тюриков сопоставима с долей курящих славян ($31,7\% \approx 33,4\%$). В связи с этим, национальные особенности курения далее не рассматривались, а половые отличия учитывались.

Некоторые записи об интенсивности курения относились к большому возрастному интервалу, включая детский возраст. Например, имеется запись, где период курения мужчины соответствует интервалу от 6 лет до 66 лет, при этом интенсивность курения – 20 сигарет в день. Очевидно, что интенсивность курения 20 сигарет

в день в возрасте 6 лет маловероятна, и, скорее всего, столь интенсивное курение соответствует возрасту на момент анкетирования. И напротив, есть запись, где период курения был от 8 до 30 лет с интенсивностью одна сигарета в день. Не исключено, что такая интенсивность курения приведена на возраст 8 лет. Для обработки таких данных были проанализированы распределения интенсивностей курения при разных возрастах начала курения. На рисунке 1 показана гистограмма распределения интенсивностей курения при начале курения в 4–6 лет и 25–35 лет.

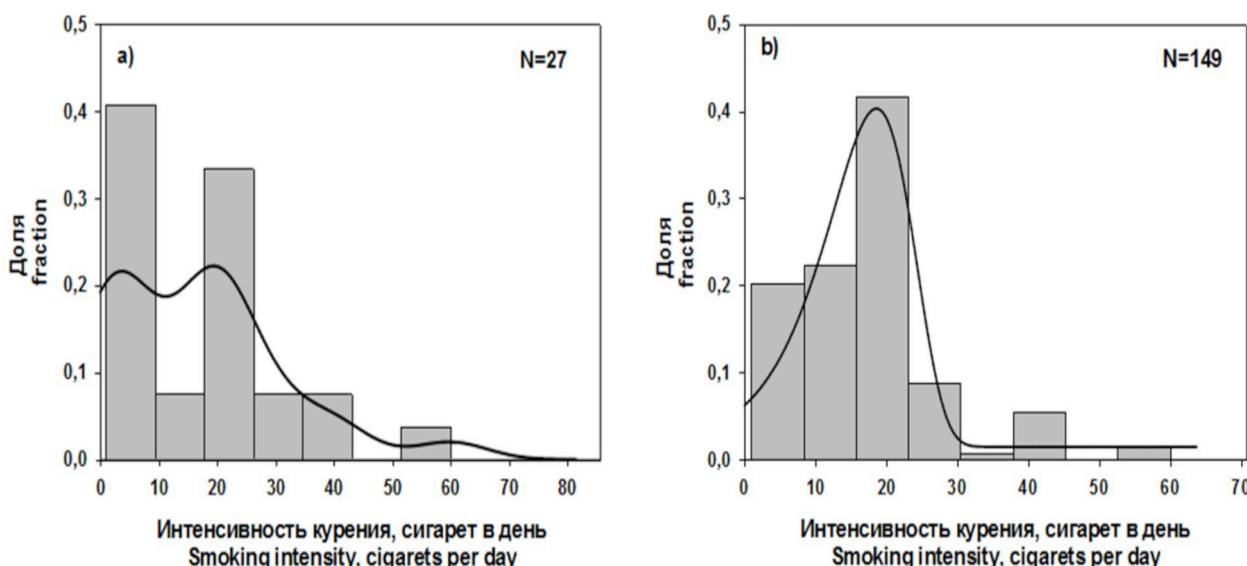


Рис. 1. Распределения значений интенсивностей курения для записей с различными возрастами начала курения: 4-6 лет (а); 25-35 лет (б). Линии – сглаживание гистограмм

[Fig. 1. Distributions of intensity of smoking values for records with different smoking initiation ages: 4-6 years old (a); 25-35 year old (b). The lines are smoothing of histograms]

Как видно из рисунка 1, для ранних возрастов начала курения наблюдается выраженная бимодальность, которую мы интерпретируем как неунифицированное приписывание анкетируемыми интенсивности курения либо на начало, либо на конец заявленного периода курения. Начиная с 18 лет начала курения выраженной бимодальности в распределениях не наблюдалось. Для случаев начала курения в детском возрасте (моменте 18 лет), заявленная интенсивность курения сравнивалась с минимумом между модами (рис. 1а) и, в соответствии с попаданием в диапазон «меньше» или «больше либо равно» этой величины, она приписывалась началу или концу интервала курения соответственно. При начале курения в возрасте 18 лет и старше указанная при анкетировании интенсивность курения приписывалась всему интервалу курения. Окончательно в анализ интенсивности курения для построения модели возрастной зависимости вошли записи о 2 881 мужчине и 275 женщинах.

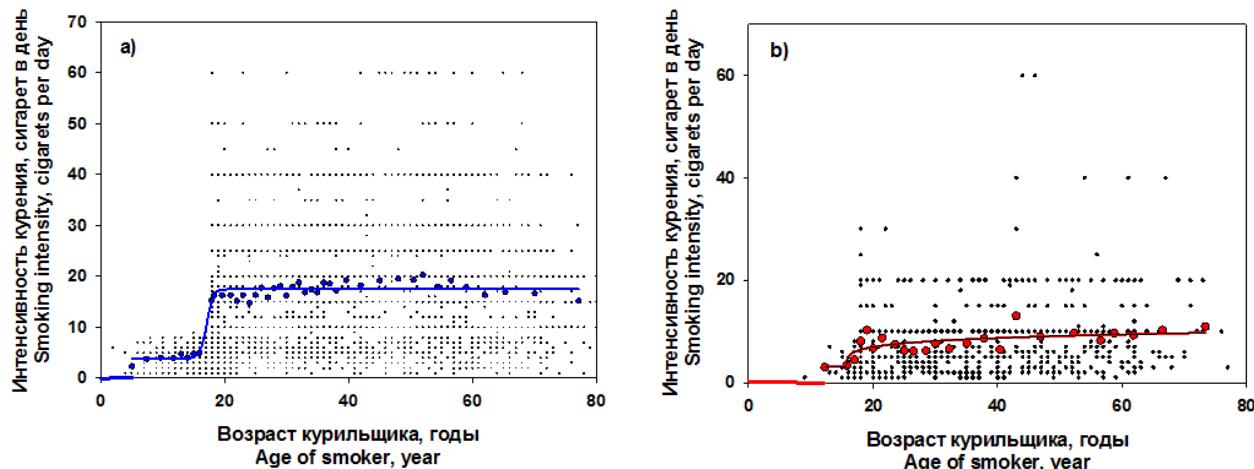


Рис. 2. Зависимость интенсивности курения от возраста у мужчин (а) и женщин (б). Точки – индивидуальные данные. Кружки – средне-групповые значения. Сплошные линии – эмпирическая модель, полученная сглаживанием среднегрупповых данных (синяя – мужчины, красная – женщины)

[Fig. 2. Dependence of smoking intensity on age in men (a) and women (b). Points are individual data. Circles are average group values. Solid lines are an empirical model obtained by smoothing average group data (blue for men, red for women)]

Согласно рисунку 2а, средняя интенсивность курения мужчин увеличивается с возрастом, после 20 лет почти не изменяется и в среднем равняется 17,5 сигарет в день.

Модель возрастной зависимости интенсивности курения для женщин $I_f(T)$ от возраста (T) представлена на рисунке 2б. После 13 лет данные наилучшим образом сглаживаются кривой сигмоидальной формы, описываемой формулой (2) ($r^2 = 0,546$, $p < 0,001$; $W = 0,9132$):

$$I_f(T) = \begin{cases} 0, & T < 13 \\ 3,15, & 13 \leq T \leq 15,8 \\ 3,15 + 11,7 * \left(1 - e^{-\left(\frac{|x-15,8|}{117,7}\right)^{0,28}}\right), & T > 15,8 \end{cases} \quad (3)$$

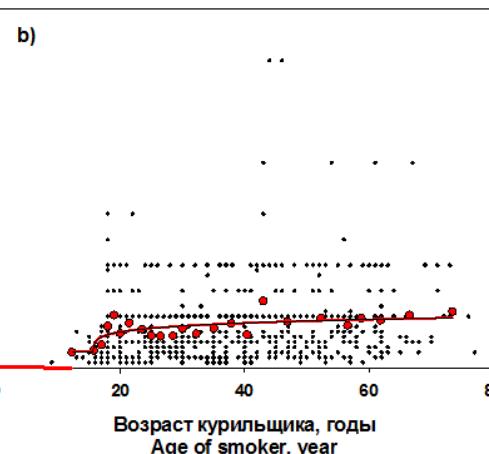
Согласно модели (рис. 2б), средняя интенсивность курения увеличивается с возрастом, после 45 лет практически не изменяется и в среднем равняется 10 сигаретам в день.

Результаты и обсуждение

Описание половозрастных зависимостей интенсивности курения в группе курильщиков

Возрастная зависимость интенсивности курения для мужчин $I_m(T)$ от возраста (T) представлена на рисунке 2а. Несмотря на большой индивидуальный разброс, средние значения интенсивностей в возрастных группах хорошо сглаживаются кривой сигмоидальной формы ($r^2 = 0,946$; $p < 0,0001$; нормальность распределения остатков по Шапиро-Уилку $W = 0,9891$), определенной на интервале старше 5 лет (минимальный возраст начала курения):

$$I_m(T) = \begin{cases} 0, & T \leq 5 \\ 3,85 + \frac{13,6}{(1 + \exp(-(T - 17,3)/0,49))^{0,83}}, & T > 5 \end{cases} \quad (2)$$



Описание половозрастных зависимостей вероятности курения

На рисунке 3 представлены результаты расчета вероятностей курения для мужчин и женщин в зависимости от возраста. Как уже упоминалось выше, статус курения у многих людей был известен только на момент опроса. Поэтому количество данных для оценок вероятности курения отличалось для разных возрастных интервалов. Максимальное количество данных имелось на возраст 40 лет (мужчины – 8 487 человек, женщины – 13 192 человека); минимальное – на возраст 63 года (мужчины – 1 884 человека, женщины – 3 821 человек).

Из рисунка 3 видно, что вероятность курения увеличивается с возрастом до 30 лет, а затем начинает уменьшаться. Это характерно как для мужчин, так и для женщин. У мужчин в диапазоне 25–35 лет она больше 70 %. И даже снижаясь с возрастом, она остается свыше 43 %. Для женщин вероятность курения в любом возрасте не превышала 5 %.

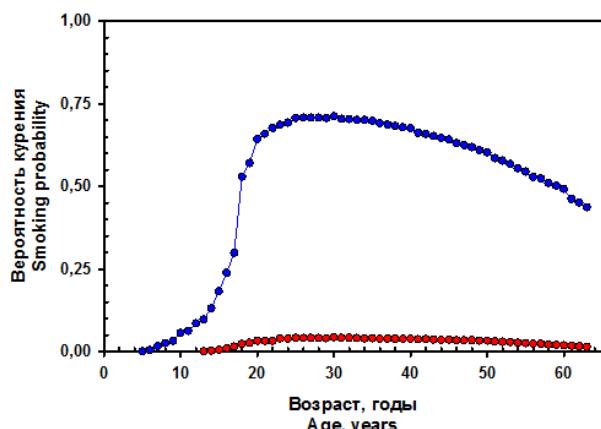


Рис. 3. Возрастная зависимость вероятности курения для мужчин (синим) и женщин (красным)
для исследуемого населения

[Fig. 3. Age dependence of smoking probability for men (blue) and women (red) for population under study]

Описание средней дозы курения в зависимости от пола и возраста

Для каждого возраста и пола была рассчитана средняя доза курения в популяции согласно выражению (1). Полученная возрастная зависимость средней дозы курения для мужчин и женщин показана на рисунке 4.

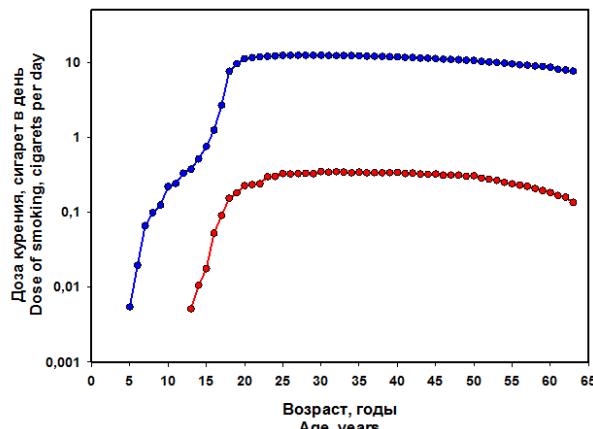


Рис. 4. Возрастная зависимость средне-популяционной дозы курения для мужчин (синим) и женщин (красным)

[Fig. 4. Age dependence of the population-average dose of smoking for men (blue) and women (red)]

Средне-популяционная доза курения как у мужчин, так и у женщин сначала увеличивается с возрастом, но после 50 лет несколько уменьшается. При этом для мужчин средняя доза курения до 18 лет не превышает 3 сигарет в день; в 18–20 лет она составляет чуть меньше 10 сигарет в день; в 20–50 лет она составляет 10–12 сигарет в день; а к 65 годам доза курения монотонно снижается до 7,5 сигарет в день. Для женщин средняя доза курения на всем диапазоне возрастов не выше одной сигареты в день. Согласно полученной модели, ожидаемая доза курения среднестатистического мужчины в УКАОН (возраст 34 года) – 12,2 сигарет в день; доза среднестатистической женщины в УКАОН (возраст 38 лет) – 0,3 сигарет в день.

Снижение дозы курения с возрастом связано со снижением доли курильщиков (вероятности курения). Это может быть связано с тем, что многие с возрастом бросали курить. Есть вероятность, что наиболее старые и больные люди могли не участвовать в опросах, что может приводить к смещенным оценкам. Однако, во избежание ошибок, связанных с невозможностью получения репрезентативной группы для пожилых людей, мы ограничиваем область определения возрастами моложе 64 лет. Половозрастная модель дозы курения не сглаживается простой функцией и будет использована в табличном виде.

Формулировка алгоритма учёта фактора курения

Полученные модели возрастных зависимостей интенсивности курения, вероятности курения и дозы курения не являются универсальными и эмпирически описывают только исследуемое население 1927–1962 годов рождения. В период 1927–1962 гг. попала и Великая Отечественная война, и тяжелый период послевоенного восстановления, и периоды относительного благополучия. Можно предположить, что те, кто родился в начале 1930-х годов и во взрослом возрасте застали войну, могут иметь другие привычки, связанные с курением, нежели те, кто родился в начале 1960-х. Однако чрезвычайно высокая индивидуальная вариабельность, которую, например, можно наблюдать по разбросу точек на рисунке 2, не позволяет обнаружить существенные различия между поколениями. Например, имеет место статистически значимая, но весьма слабая корреляция (по Пирсону) между годом рождения и интенсивностью курения ($r = -0,135$; $p < 0,0001$). То есть имеет место слабая тенденция к снижению интенсивности курения у курильщиков более поздних годов рождения. Однако разделение данных на группы людей с разными годами рождения приводят к снижению статистической мощности, но не демонстрируют различий между подгоночными моделями интенсивности курения (разница менее 8%). Поэтому для описания уровней курения в УКАОН для лиц исследованных годов рождения было принято решение не усложнять модель и не включать год рождения как независимую переменную.

Обнаруженные тенденции снижения количества курящих от года рождения и возраста (включая возраст начала курения) хорошо согласуются с литературными данными, описывающими наблюдения в других регионах России [15–17]. Тем не менее, следует с осторожностью экстраполировать полученные результаты на другие территории и годы рождения.

Считая, что характеристики курения у членов УКАОН репрезентативно отражены в регистре факторов риска населения наблюдаемой территории, использованном в текущем исследовании, был сформулирован алгоритм учёта фактора курения при совместном анализе радиационных и нерадиационных рисков:

1. Если у человека есть индивидуальные данные интенсивности курения, то следует использовать их в качестве индивидуальной дозы курения.
2. Если известно, что человек не курит, то доза курения равна нулю.
3. Если известно, что человек курит, но неизвестна интенсивность курения, то в качестве дозы для человека определенного пола и возраста следует использовать среднюю интенсивность курения согласно выражениям (2) и (3).
4. Если неизвестен статус курения, то для человека определенного пола и возраста следует использовать дозу

курения согласно рисунку 4. Для лиц старше 64-х лет принимаются фиксированные значения дозы курения: у мужчин – 7,5 сигарет в день; у женщин – 0,1 сигарет в день.

Индивидуализированные таким образом дозы курения будут использованы при анализе рисков заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований в комбинации с дозой ионизирующего излучения. Предполагается использовать регрессионные модели Кокса и Пуассона [18]:

$$h(t) = h_0(t) \cdot \exp(\beta_{rad} \cdot D_{rad} + \beta_{smk} \cdot D_{smk})$$

$$h(t) = \exp(\beta_1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_{rad} \cdot D_{rad} + \beta_{smk} \cdot D_{smk})$$

где D_{rad} и D_{smk} – дозы радиационные и курения соответственно; β_{rad} и β_{smk} – параметры влияния доз радиации и курения соответственно; в регрессионной модели Кокса $h_0(t)$ – исходный уровень риска (базовый уровень); β_1 и β_2 – линейный и квадратичный члены возрастной зависимости риска в модели Пуассона.

Дозы ионизирующего излучения для жителей Уральского региона оценивались также по усредненным данным доступных измерений и индивидуализировались по полу и возрасту (а также по месту проживания в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения территорий). Индивидуальные измерения содержания ^{90}Sr в биопробах или во всем организме были доступны для 40 % членов объединенной когорты р. Течи и ВУРС [19]. Таким образом, предлагаемый метод оценки дозы курения гармонизирован с методом расчета доз ионизирующего излучения.

Заключение

Полученные результаты будут использованы для дальнейших эпидемиологических исследований по оценке совместного воздействия ИИ и курения на заболеваемость и смертность в УКАОН от рака лёгкого и других нозологий. В модель радиационного риска будут включены две независимые переменные – доза облучения и доза курения. Это позволит оценить сочетанное влияние обоих факторов.

Настоящее исследование выполнено для конкретного населения (сельские жители, родившиеся в основном в советский период времени). Поскольку социокультурные, экономические факторы, а также современные ограничительные меры государственной политики в отношении курения влияют на формирование этой вредной привычки, то следует с осторожностью в прямую экстраполировать полученные результаты на другие территории и годы рождения людей. Тем не менее, метод оценки дозы курения, предлагаемый в настоящем исследовании, может применяться для учёта фактора курения в других эпидемиологических когортах в случаях недостаточного количества индивидуальных данных. В дальнейшем планируется оценить неопределенность модели и ее влияние на совместный анализ радиационных и нерадиационных рисков.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Ахмадуллин Р.М. – статистическая обработка данных, написание рукописи, редактирование рукописи;

Шишкина Е.А. – концепция и дизайн исследования, статистическая обработка данных, написание рукописи, редактирование рукописи, утверждение окончательного варианта публикуемой версии рукописи;

Крестинина Л.Ю. – сбор и обработка материала, редактирование рукописи, утверждение окончательного варианта публикуемой версии рукописи.

Благодарности

Авторы благодарят коллектив эпидемиологической лаборатории за предоставление информации о курении из регистра нерадиационных факторов риска облученного населения, сформированного в течение нескольких десятилетий.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело финансовой поддержки.

Литература

1. Карпин А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Злокачественные новообразования в России в 2019 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П. А. Герцена, филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2020. 252 с.
2. Siegel R.L., Miller K.D., Fuchs H.E., Jemal A. Cancer statistics, 2022 // Cancer Journal for Clinicians. 2022. Vol. 72, No. 1. P. 7-33. DOI:10.3322/caac.21708.
3. 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.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2019 Sources and effects of ionizing radiation Report to the general assembly, with scientific annexes. New York: United Nations, 2020. 312 p.
5. Туков А.Р., Шафранский И.Л., Бирюков А.П. и др. Риск смерти от рака легких среди ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС, работников предприятий атомной промышленности // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. 2022. Т. 11, № 5. С. 25-30. DOI:10.17116/onkolo g20221105125.
6. Hunter N., Haylock R. Extended analysis of solid cancer incidence among nuclear industry workers in the UK 1955-2011: comparison of workers first hired in earlier and later periods // Journal of Radiological Protection. 2024. Vol. 44, No. 2. DOI:10.1088/1361-6498/ad4c72.
7. ВОЗ. Рак лёгкого. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/lung-cancer> (Дата обращения: 25.11.2024).
8. La Vecchia C., Franceschi S., Bosetti C. et al. Time Since Stopping Smoking and the Risk of Oral and Pharyngeal Cancers // Journal of the National Cancer Institute. 1999. Vol. 91, No. 8. P. 726-728. DOI:10.1093/jnci/91.8.726a.
9. Reitsma M., Kendrick P., Anderson J. et al. Reexamining Rates of Decline in Lung Cancer Risk after Smoking Cessation. A Meta-analysis // Annals of the American Thoracic Society. 2020. Vol. 17, No. 9. P. 1126-1132. DOI:10.1513/annalsats.201909-659oc.
10. Tindle H.A., Duncan M.S., Greevy R.A. et al. Lifetime smoking history and risk of lung cancer: Results from the Framingham Heart Study // Journal of the National Cancer Institute. 2018. Vol. 110, No. 11. P. 1201-1207. DOI:10.1093/jnci/djy041.
11. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев В.Н., Аклеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т.21, №3. С. 393-402.
12. Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьёва М.И. и др. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949-1956 гг. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 5. С. 523-534. DOI:10.7868/s0869803116050039.
13. Авраменко М.И., Аверин А.Н., Лобойко Б.Г. и др. Авария 1957 г. Оценка параметров взрыва и анализ характеристик радиационного загрязнения территории // Вопросы радиационной безопасности. 1997. № 3. С. 18-28.
14. Соловьев В.Ю., Уйба В.В., Самойлов А.С. и др. Радиационные инциденты на территории бывшего СССР в 1950-1991 гг. и в Российской Федерации в 1992-2016 гг. с пострадавшими с диагнозом "острая лучевая болезнь" (обзор) // Медицина экстремальных ситуаций. 2017. № 2. С. 119-127.

15. Баланова Ю.А., Имаева А.Э., Шальнова С.А. и др. Поведенческие факторы риска в российской популяции: фокус на потребление табака. Результаты исследования ЭССЕ-РФ3 // Профилактическая медицина. 2024. Т. 27, № 1. С. 36-44. DOI:10.17116/profmed20242710136.
16. Бабанов С.А., Захарова Н.О. Табакокурение среди лиц старшего возраста // Клиническая геронтология. 2006. № 3. С. 46-48.
17. Постникова Л.Б., Доровской И.А., Костров В.А. и др. Эпидемиологическая характеристика табакокурения и сравнительная оценка состояния респираторной системы у молодых мужчин // Пульмонология. 2016. Т. 26, № 1. С. 52-58. DOI:10.18093/0869-0189-2016-26-1-52-58.
18. Kazutaka D., Shinji Y. Impact of confounding by smoking on cancer risk estimates in cohort studies of radiation workers: a simulation study // Journal of Radiation Research. 2025. Vol. 66, No. 2. P. 115–128. DOI:10.1093/jrr/rraf012.
19. Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Дегтева М.О. и др. Индивидуализация доз внутреннего облучения для жителей прибрежных сел реки Течи: усовершенствование алгоритма расчетов / Радиобиология и экологическая безопасность – 2023: материалы международной научной конференции (25–26 мая 2023 г., Гомель). Минск: ИВЦ Минфина, 2023. С. 307-309.

Поступила: 11.05.2025

Ахмадуллин Роман Марселяевич – студент магистратуры программы 06.04.01 «Радиационная биология» биологического факультета, Челябинский государственный университет, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Адрес для переписки: 454001, Челябинск, Россия, ул. Братьев Кашириных, д. 129; E-mail: rommrr3102@bk.ru

ORCID: 0009-0004-9488-9599

Шишкина Елена Анатольевна – доктор биологических наук, доцент кафедры радиационной биологии биологического факультета, Челябинский государственный университет, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; исполняющая обязанности заведующей биофизической лабораторией, Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0003-4464-0889

Крестинина Людмила Юрьевна – кандидат медицинских наук, заведующая эпидемиологической лабораторией, Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0003-0497-5879

Для цитирования: Ахмадуллин Р.М., Шишкина Е.А., Крестинина Л.Ю. Половозрастная модель интенсивности курения населения, облученного на Южном Урале // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 41–48. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-41-48

Age-sex model of smoking intensity for the population exposed to radiation in the Southern Urals

Roman M. Akhmadullin¹, Elena A. Shishkina^{1,2}, Lyudmila Yu. Krestinina²

¹ Chelyabinsk State University, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Chelyabinsk, Russia

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

The study of smoking probability and intensity in the Ural region is for the subsequent analysis of combined smoking and radiation effect on lung cancer risk. The smoking dose - number of cigarettes per day smoked by a conditional cohort member of a certain sex and age (the product of smoking probability and an average smoking intensity) was introduced. The study purpose is developing a sex- and age-specific smoking dose model. Materials and Methods: The smoking information register was used (48,694 records for 24,587 Ural residents born in 1889–1997). Smokers are the people who had ever smoked. The probability theory, distribution analysis and regression analysis were used. Results and Discussion: The smoking intensity increases up to 40 years, and then becomes constant and equal to 17.5 and 10 cigarettes per day for men and women, respectively. The smoking probability increases with age up to 30 years, and then it decreases. The smoking probability in men over 18 years exceeds 40%. For women, the smoking probability is ≤ 5% at any age. Smoking doses of a conditional men and women aged 35 years are 12.2 and 0.3 cigarettes per day, respectively. An algorithm for smoking dose assigning was formulated to analyze the effects in the South Urals Population Exposed to Radiation cohort. The results should be extrapolated to other territories and generations with caution. Conclusion: The proposed method of smoking dose assigning can be used in other epidemiological cohorts with insufficient individual data. Evaluation of model uncertainty and model impact on the joint analysis of radiation and non-radiation risks is the further directions of the study.

Key words: smoking, smoking intensity, smoking probability, smoking dose, lung cancer, algorithm of accounting of smoking.

Roman M. Akhmadullin

Chelyabinsk State University

Address for correspondence: 129, Bratiev Kashirinykh Str., Chelyabinsk, 454001, Russia; E-mail: rommrr3102@bk.ru

Authors' personal contribution

Akhmadullin R.M. – data processing, writing manuscript, editing manuscript.

Shishkina E.A. – the concept and design of the study, statistical data processing, writing manuscript, editing manuscript, approval of manuscript final version.

Krestinina L.Yu. – collection and processing of material, editing manuscript, approval of manuscript final version.

Acknowledgments

The authors thank the staff of the epidemiological laboratory for providing information on smoking from the register of non-radiation risk factors of the exposed population, formed over several decades.

The authors express the gratitude to the anonymous reviewers for the work done.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study had no financial support.

References

8. La Vecchia C, Franceschi S, Bosetti C, Levi F, Talamini R, Negri E. Time Since Stopping Smoking and the Risk of Oral and Pharyngeal Cancers. *Journal of the National Cancer Institute*. 1999;91(8): 726-728. DOI:10.1093/jnci/91.8.726a.
9. Reitsma M, Kendrick P, Anderson J, Arian N, Feldman R, Gakidou E, et al. Reexamining Rates of Decline in Lung Cancer Risk after Smoking Cessation. A Meta-analysis. *Annals of the American Thoracic Society*. 2020;17(9): 1126-1132. DOI:10.1513/annalsats.201909-659oc.
10. Tindle HA, Duncan MS, Greevy RA, Vasan RS, Kundu S, Massion PP, et al. Lifetime smoking history and risk of lung cancer: Results from the Framingham Heart Study. *Journal of the National Cancer Institute*. 2018;110(11): 1201-1207. DOI:10.1093/jnci/djy041.
11. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev NV, Akleyev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditina ekstremalnykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393-402. (In Russian).
12. Degteva MO, Shagina NB, Vorobeva MI, Shishkina EA, Tolstykh El, Akleyev AV. Modern understanding of radioactive contamination of the Techa River in 1949-1956. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(5): 523-534. DOI:10.7868/s0869803116050039. (In Russian).
13. Avramenko MI, Averin AN, Loboiko BG, Filin VP, Glagolenko YuV, Drozhko EG, et al. Accident of 1957 Assessment of explosion parameters and analysis of characteristics of radiation pollution of the territory. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 1997;3: 18-28. (In Russian).
14. Solovyov VYu, Uiba VV, Samoilov AS, Bushmanov AYu, Ilin LA, Guskova AK. Radiation incidents on the territory of the former USSR in 1950-1991 and in the Russian Federation in 1992-2016 with victims diagnosed with acute radiation sickness (review). *Meditina ekstremalnykh situatsiy = Emergency medicine*. 2017;2: 119-127. (In Russian).
15. Balanova YUa, Imaeva AE, Shalnova SA, Kutsenko VA, Maksimov SA, Soplenkova AG, et al. Behavioral risk factors in the Russian population: focus on tobacco consumption. The ESSE-RF3 study results. *Profilakticheskaya meditsina = Preventive medicine*. 2024;27(10): 36-44. DOI:10.17116/profmed20242710136. (In Russian).
16. Babanov SA, Zakhарова NO. Tobacco smoking among older people. *Klinicheskaya gerontologiya = Clinical Gerontology*. 2006;3: 46-48. (In Russian).
17. Postnikova LB, Dorovskoy IA, Kostrov VA, Manyukova ET, Dolbin IV, Kurysheva MA. Epidemiology of tobacco smoking and assessment of respiratory status of young men. *Pulmonologiya = Pulmonology*. 2016;26(1): 52-58. DOI:10.18093/0869-0189-2016-26-1-52-58. (In Russian).
18. Kazutaka D, Shinji Y. Impact of confounding by smoking on cancer risk estimates in cohort studies of radiation workers: a simulation study. *Journal of Radiation Research*. 2025;66(2): 115-128. DOI:10.1093/jrr/rraf012.
19. Shishkina EA, Tolstykh El, Degteva M.O. Individualization of internal exposure doses for the residents of nearshore villages of the Techa River: improvement of the calculation algorithm. In Radiobiology and Environmental Safety – 2023: proceedings of the International Scientific Conference (May 25-26, 2023, Gomel). Minsk: IVC of the Ministry of Finance; 2023. 307-309.

Received: May 11, 2025

For correspondence: Roman M. Akhmadullin – Master's Dearee Student of program 06.04.01 "Radiation Biology" of the Faculty of Biology, Chelyabinsk state university, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (129, Bratiev Kashirinykh Str., Chelyabinsk, 454001, Russia; E-mail: rommrr3102@bk.ru)
ORCID: 0009-0004-9488-9599

Elena A. Shishkina – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Radiation Biology of the Faculty of Biology, Chelyabinsk State University, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; Acting Head of the Biophysical Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia
ORCID: 0000-0003-4464-0889

Lyudmila Yu. Krestinina, Candidate of Medical Sciences, Head of the Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia
ORCID: 0000-0003-0497-5879

For citation: Akhmadullin R.M., Shishkina E.A., Krestinina L.Yu. Age-sex model of smoking intensity for the population exposed to radiation in the Southern Urals. *Radiatsionnaya Gygiene = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 41–48. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-41-48

Обоснование подходов к гигиеническому нормированию и контролю радиационной обработки пищевой продукции в Российской Федерации

Кузьмин С.В.¹, Есаулова О.В.¹, Горина И.Е.^{1,2}, Мощенская Н.В.^{1,2}, Водоватов А.В.^{3,4}

¹ Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Московская область, Мытищи, Россия

² Малое инновационное предприятие «Научно-производственный центр им. Ф.Ф. Эрисмана», Тула, Россия

³ 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

⁴ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассмотрены современные подходы к применению ионизирующего излучения для обеспечения микробиологической безопасности пищевой продукции. В международной практике вопросы обеспечения радиационной безопасности при обработке пищевой продукции ионизирующими излучением хорошо проработаны. Разработан и внедрен в практику ряд национальных и международных регулирующих документов, устанавливающих требования к обработанной ионизирующими излучением продукции. Напротив, на территории Российской Федерации и Евразийского экономического союза отсутствует гигиеническое нормирование и контроль со стороны государства в области радиационных биотехнологий, а также специальные санитарные нормы, устанавливающие предельно допустимые дозы облучения для различных категорий пищевой продукции. Цель работы – анализ отечественных и международных регулирующих документов, устанавливающих требования к радиационной обработке пищевой и сельскохозяйственной продукции, для разработки комплекса требований к гигиеническому нормированию такой продукции в Российской Федерации. Материалы и методы: Работа была выполнена путем сравнительного анализа регулирующих документов МАГАТЭ, ВОЗ, ФАО, а также национального законодательства стран, активно использующих методы радиационной обработки пищевых продуктов. Результаты исследования и обсуждение: Проведен анализ международных стандартов, выявлены существующие пробелы в нормативной базе Российской Федерации. Показано, что отсутствие специальных санитарных норм и методик идентификации облученной продукции затрудняет контроль и снижает прозрачность рынка. Заключение: Подчеркнута необходимость разработки системы гигиенического нормирования и государственного контроля для обеспечения качества и безопасности продукции, обработанной ионизирующими излучением.

Ключевые слова: радиационная обработка, ионизирующее излучение, гигиеническое нормирование, микробиологическая безопасность, радиационные биотехнологии.

Введение

В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации¹, обеспечение безопасности пищевых продуктов необходимо контролировать на соответствие требованиям законодательства Российской Федерации в области сельскохозяйственной, рыбной продукции и продовольствия на всех стадиях их производства, хранения, транспортировки, переработки и реализации, для чего необходимо совершенствовать систему организации контроля безопасности пищевых продуктов, включая создание современной технической и методической базы.

Современные угрозы пищевой безопасности связаны с высокой распространённостью патогенных микроорганизмов в пищевой продукции. *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* и другие микроорганизмы ежегодно являются причиной единичных и массовых пищевых отравлений различной степени тяжести во всем мире. Традиционные методы обработки (пастеризация, химическая консервация) не всегда применимы, особенно для свежих, сухих или чувствительных к термообработке продуктов, для которых требуется сохранить исходные свойства. Ионизирующее излучение рассматривается как современный метод обеззараживания, признанный Все-

¹ Указ Президента РФ от 21.01.2020 №20 [Decree of the President of the Russian Federation dated 01/21/2020 No. 20 (In Russ.)]

Кузьмин Сергей Владимирович

Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана

Адрес для переписки: 141014, Россия, Московская область, Мытищи, ул. Семашко, д. 2; E-mail: fnccg@fnccg.ru

мирной организацией здравоохранения (ВОЗ), Продовольственной и сельскохозяйственной Организацией Объединённых Наций (ФАО), Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и регулирующими органами более 60 стран мира [1–16]. Высокая эффективность радиационной обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции с целью соответствия установленным требованиям по показателям фитосанитарной и микробиологической безопасности подтверждена многочисленными исследованиями [17–25]. Ионизирующее излучение эффективно уничтожает микроорганизмы, включая патогенные бактерии, плесени и дрожжи, значительно повышая безопасность продуктов.

Для облучения пищевой и сельскохозяйственной продукции, как правило, используют радиационно-технологические промышленные установки, обеспечивающие облучение пучками электронов (с энергией до 10 МэВ), тормозного излучения (с максимальной энергией до 5 МэВ), и гамма-излучения (на основе источников ^{60}Co или ^{137}Cs), для решения следующих задач:

- уничтожения патогенных микроорганизмов и паразитов;
- снижения количества микроорганизмов, вызывающих порчу продукции;
- продления сроков годности (хранения) продукции;
- фитосанитарной обработки продукции;
- подавления прорастания луковиц, клубней и корнеплодов.

В настоящее время на территории Российской Федерации и Евразийского экономического союза отсутствует гигиеническое нормирование и контроль со стороны государства в области радиационных биотехнологий, а также специальные санитарные нормы, устанавливающие предельно допустимые дозы облучения для различных категорий пищевой продукции. Методики качественной и количественной идентификации облучённой продукции в обороте также отсутствуют, что затрудняет деятельность органов санитарно-эпидемиологического надзора и снижает прозрачность рынка.

Напротив, в международной практике вопросы обеспечения радиационной безопасности при обработке пищевой продукции ионизирующими излучением хорошо проработаны. Разработан и внедрен в практику ряд национальных и международных регулирующих документов, устанавливающих требования к обработанной ионизирующими излучением продукции, необходимые для надлежащей обработки уровни поглощенных доз в продукции, методики радиационного контроля и контроля качества процесса обработки.

Цель исследования – анализ отечественных и международных регулирующих документов, устанавливающих требования к радиационной обработке пищевой и сельскохозяйственной продукции, для разработки комплекса требований к гигиеническому нормированию такой продукции в Российской Федерации.

Материалы и методы

Работа была выполнена путем анализов текстов отечественных и международных регулирующих документов МАГАТЭ, ВОЗ, ФАО, а также национального законодательства стран, активно использующих методы радиационной обработки пищевых продуктов. Отбор регулирующих документов осуществлялся путем поиска на официальных сайтах МАГАТЭ, ВОЗ, ФАО, а также на интернет-порталах правовой информации соответствующих стран (США, Японии, Китая, стран Евросоюза и др.). Поиск осуществлялся по ключевым словам: «radiation treatment», «radiation treatment of food products».

После поиска по ключевым словам в полученной выборке идентифицировали документы с нормативными требованиями к процессу радиационной подготовки, а также с рекомендуемыми диапазонами доз облучения продукции.

Результаты и обсуждение

В 1983 году ФАО, ВОЗ и МАГАТЭ разработан и введен в действие международный стандарт, регулирующий облучение пищевых продуктов – Кодекс Алиментариус. Целями нормативного регулирования облучения пищевой продукции являются:

а) подтверждение того, что облучение пищевых продуктов выполнено безопасно и правильно, в соответствии со всеми необходимыми стандартами Кодекса и гигиеническими нормами и правилами;

б) создание системы документации для сопровождения пищевых продуктов, подвергшихся облучению, поскольку факт облучения должен быть принят во внимание при последующих погрузочно-разгрузочных операциях, хранении и продаже;

в) подтверждение того, что облученные пищевые продукты, которые поступают в реализацию, соответствуют допустимым нормам облучения и имеют правильную маркировку.

При проведении радиационной обработки ионизирующими излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции минимальная поглощенная доза ионизирующего излучения должна быть достаточной для достижения технологической цели, а максимальная не должна превышать уровень, при котором возникает риск для безопасности потребителя или нарушение структурной целостности, функциональных или органолептических свойств продукции. К 1997 году Международная Консультативная группа по облучению пищевых продуктов на основе многолетних исследований влияния ионизирующего излучения на продукты питания выпустила ряд заключений о безопасности облучения пищевых продуктов различными дозами как до, так и свыше 10 кГр.

В настоящее время технология обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции ионизирующими излучением используется в большинстве стран мира, в том числе в США, странах Евросоюза, Японии, Китае, Вьетнаме, Канаде, Австралии, Израиле, Турции, Аргентине, Бангладеш, Бразилии, Индии, Мексике, Филиппинах, Украине, Таиланде, Турции и др. [16].

Результаты анализа национальных практик показывают, что перечни допустимых к облучению пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции, а также необходимые уровни доз существенно отличаются между различными странами.

Так, департамент здравоохранения США (FDA) разрешает облучение ряда категорий продуктов при соблюдении условий раздела 21 CFR 179.26 Кодекса федеральных правил США. Облучению подвергают пряности, травы и сухие приправы (для обеззараживания, доза до 30 кГр) [1], охлаждённое мясо птицы (для уничтожения патогенов, до 4.5–7.0 кГр) [1], молотое говяжье мясо, свежее мясо (упомянуто в пункте 6–8 21 CFR 179.26) и ряд других продуктов (см. полный список 21 CFR 179.26) [1]. Облученные продукты обязательно маркируются: на этикетке должен быть знак «Радура» и надпись «Treated with radiation (Treated by irradiation)» [1]. Следует отметить, что в США облучение продукции является обязательным в рамках фитосанитарной обработки для импорта. Например, APHIS (Служба карантинна США) требует облучать свежие фрукты для борьбы с вредителями [2]. Весь облученный импорт также должен содержать соответствующие сертификаты и маркировку (решение APHIS, 7 CFR 305).

В Канаде Health Canada и CFIA допускают облучение определенного круга продуктов. На сегодняшний день одобрены: картофель и лук (для подавления прорастания), пшеница и мука (для борьбы с насекомыми), цельнозерновая мука, целые и молотые специи, сухие приправы, а также свежий и замороженный сырой говяжий фарш [3]. При этом облучение не является обязательным – регламенты разрешают его применять по усмотрению производителя [3]. Все облученные продукты должны иметь маркировку: на упаковке – знак «Радура» и надпись «Облучено (Irradiated)» [3]. Более того, если готовый продукт содержит облученный ингредиент ($\geq 10\%$ от состава), в списке ингредиентов этот ингредиент указывается с пометкой «irradiated» [3].

В Китае действует национальный стандарт GB 14891, который определяет категории продуктов, допущенных к облучению. В него входят: мясные продукты, орехи и консервированные фрукты, сушёные специи, свежие фрукты и овощи, свинина, замороженное фасованное мясо (крупного рогатого скота и птицы), а также бобы и зерно [4]. Для каждой категории устанавливаются максимальные дозы излучения [5]. Облучение применяется по усмотрению производителей (как правило – для стерилизации и борьбы с вредителями) и не является обязательным требованием. Все облучённые продукты подлежат маркировке в соответствии с китайскими стандартами пищевой безопасности (например, требуется пометка облучения по GB 7718, аналогично международному стандарту) [5, 4].

В Японии официально разрешено Food Sanitation Act. облучение картофеля для подавления прорастания [6]. Картофель после облучения допускается к продаже, но при этом на этикетке обязательно указывается дата облучения (и надпись «облучено»). Также японское законодательство предъявляет общие требования к упаковке: запрещается использование упаковочных материалов, выделяющих токсичные вещества в пищу [6].

В ЕС облучение продуктов регулируется следующими документами: Директива 1999/3/EC (OJ L 66, p24, 13.03.99) от 22 февраля 1999 года об утверждении списка продуктов питания и пищевых ингредиентов, обработанных ионизирующими излучением [7], Директива 1999/2/EC (OJ L 66, p16,

13.03.99) от 22 февраля 1999 года о сближении законодательства государств-членов в отношении продуктов питания и пищевых ингредиентов, обработанных ионизирующим излучением [8], и Решение Комиссии 2002/840/EC (OJ L 287, p40, 25.10.2002) от 23 октября 2002 года, утверждающее список одобренных предприятий в третьих странах для облучения пищевых продуктов [9].

Облучение разрешено при обоснованной необходимости и лимитировано. В настоящий момент единый общеевропейский разрешённый список включает сухие ароматические травы, специи и приправы (максимальная доза – 10 кГр) [7]. Другие продукты можно облучать в соответствии с национальным законодательством (Бельгия, Чехия, Франция, Италия, Нидерланды, Польша и Великобритания имеют национальные разрешения на обработку отдельных категорий продуктов) вплоть до полной гармонизации законодательств стран-участниц ЕС [7]. Все облучённые продукты (а также продукты, содержащие облучённые ингредиенты) должны быть отмечены маркировкой: на этикетке указывается слово «irradiated» или «облучено» [10]. Упаковка, контактирующая с пищей, должна соответствовать общим правилам безопасности материалов, как, например, установлено в регламентах на пищевую упаковку.

Во всех рассмотренных государствах упаковочные материалы, используемые для облучённых продуктов, должны отвечать общим стандартам безопасности пищевой упаковки (например, соответствовать требованиям 21 CFR 174–186 в США или Регламента ЕС 1935/2004). Касательно маркировки, обязательны специальные обозначения: во-первых, все облучённые продукты должны иметь символ «Радура» и фразу «облучено» (в США – «Treated with radiation») [1, 10, 11]; во-вторых, продукт, содержащий облучённый ингредиент, также должен сопровождаться соответствующей пометкой в списке ингредиентов (в Канаде – если доля $\geq 10\%$ [3], в ЕС – в любом случае [3, 10, 11]). Эти требования гарантируют информирование потребителя об обработке продукта и облучении его компонентов.

По результатам анализа международных публикаций были сформированы требования по диапазонам поглощенных доз, использующихся для облучения различных видов пищевой и сельскохозяйственной продукции (табл.).

Таблица

Рекомендуемые диапазоны доз при обработке пищевой и сельскохозяйственной продукции ионизирующим излучением

[Table]

Recommended dose ranges for ionizing radiation treatment of food and agricultural products]

Минимальные поглощенные дозы [Minimal absorbed doses]		Цель обработки ионизирующим излучением [Purpose of ionizing radiation treatment]	Примеры обрабатываемой продукции [Examples of processed products]
От [From]	До [To]		
		Замедление прорастания [Germination retardation]	Картофель, лук, чеснок [Potatoes, onions, garlic]
		Задержка созревания [Maturation delay]	Свежие фрукты [Fresh fruits]
0,1 кГр [0,1 kGy]	1,0 кГр [1,0 kGy]	Подавление репродуктивной функции насекомых (фитосанитарная обработка) [Insect reproductive suppression (phytosanitary treatment)]	Свежая пищевая и сельскохозяйственная продукция [Fresh food and agricultural products]
		Уничтожение насекомых-вредителей [Pest control]	Сушеная рыба, сухофрукты и бобовые [Dried fish, dried fruits and legumes]
		Инактивация паразитарных организмов (гельминты и простейшие) [Inactivation of parasitic organisms (helminths and protozoa)]	Мясная продукция, свежие фрукты и овощи [Meat products, fresh fruits and vegetables]

Минимальные поглощенные дозы [Minimal absorbed doses]	Цель обработки ионизирующим излучением [Purpose of ionizing radiation treatment]	Примеры обрабатываемой продукции [Examples of processed products]
От [From]	До [To]	
	Снижение количества микробиологических организмов, вызывающих порчу и продление срока годности [Reduction of the number of microbiological organisms that cause spoilage and extending shelf life]	Охлажденное мясо и рыба, готовые к употреблению блюда, свежие ягоды [Chilled meat and fish, ready-to-eat meals, fresh berries]
1,0 кГр [1,0 kGy]	10,0 кГр [10,0 kGy]	Инактивация неспорообразующих бактерий (<i>Salmonella</i> , <i>Campylobacter</i> , <i>Listeria</i>) [Inactivation of non-spore-forming bacteria (<i>Salmonella</i> , <i>Campylobacter</i> , <i>Listeria</i>)]
	Снижение микробиологической обсеменённости [Reduction of microbiological contamination]	Охлажденное и замороженное мясо, рыба и морепродукты, нарезанные фрукты и овощи [Chilled and frozen meat, fish and seafood, sliced fruits and vegetables]
		Сухие пряности, травы и овощные приправы и др. сухая пищевая продукция [Dry spices, herbs and vegetable seasonings, etc. dry food products]

Как правило, большая часть паразитарных организмов уничтожается при минимальных дозах облучения от 0,1 до 1 кГр; большая часть грибов и плесени уничтожается при минимальных дозах облучения от 3 до 6 кГр; большая часть вегетативных бактерий сокращает численность или уничтожается при минимальной дозе от 4 до 7 кГр, большая часть спорообразующих бактерий сокращает численность до приемлемого уровня при минимальной дозе выше 8 кГр [12-15].

Максимальная допускаемая поглощенная доза при проведении радиационной обработки ионизирующим излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции составляет 10,0 кГр [15].

Максимальная поглощенная доза при проведении радиационной обработки ионизирующим излучением упаковки для пищевой и сельскохозяйственной продукции из бумаги, картона и полимерных материалов (целлюлоза, полиолефины, полиэфиры, полистирольные пластики, поливинилхлоридные пластики, полиамидные пластики, полимеры на основе винилацетата и его производных, поликарбонаты и аналогичные материалы, соответствующие установленным требованиям) составляет 10 кГр; упаковки из иных видов материалов и непродовольственных товаров – 30,0–60,0 кГр (в том числе при обработке с целью стерилизации) [12].

Действующие на территории Российской Федерации нормативные правовые акты (технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой

продукции»², технический регламент Таможенного союза ТР ТС 027/2012 «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания»³, технический регламент Таможенного союза ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств»⁴, Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю)⁵», содержат лишь общие положения о возможности проведения радиационной обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции, не включают гигиенических нормативов и не определяют дифференцированные требования для оценки безопасности и эффективности радиационной обработки продукции.

Требования по радиационной безопасности установлены только для условий эксплуатации радиационных установок, использующихся, в том числе, и для проведения радиационной обработки пищевых и сельскохозяйственных продуктов (СанПиН 2.6.4115-25⁶). Они определяют условия размещения и эксплуатации объекта, требования к обеспечению радиационной защиты персонала и населения. При этом обязательные требования к контролю качества при проведении радиационной обработки (производственному радиационному контролю, необходимым поглощенным дозам в продукции и пр.) не установлены.

² ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции». М.: ЕЭК, 2011 [TR CU 021/2011 "On food safety". Moscow: EEC, 2011 (In Russ.)]

³ ТР ТС 027/2012 «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания». М.: ЕЭК, 2012 [TR CU 027/2012 "On the safety of certain types of specialized food products, including dietary therapeutic and dietary preventive nutrition." Moscow: EEC; 2012 (In Russ.)]

⁴ ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств». М.: ЕЭК, 2012 [TR CU 029/2012 "Safety requirements for food additives, flavorings and technological aids." Moscow: EEC; 2012 (In Russ.)]

⁵ Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю): утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 28.05.2010 № 299 (с изм. и доп.) Unified sanitary-epidemiological and hygienic requirements for products (goods) subject to sanitary-epidemiological supervision (control): approved by the Government of the Russian Federation. By the decision of the Commission of the Customs Union dated 05/28/2010 No. 299 (as amended and supplemented) (In Russ.)

⁶ СанПиН 2.6.4115-25 «Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения», утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 27.03.2025 № 6 [SanPiN 2.6.4115-25 "Sanitary and epidemiological requirements in the field of radiation safety of the population when handling ionizing radiation sources", approved by Resolution No. 6 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 03/27/2025 (In Russ.)]

Возможность и общие принципы ионизирующей обработки установлены в действующих технических регламентах на пищевую продукцию и национальных стандартах (ГОСТ 33339-2015⁷, ГОСТ 33340-2015⁸, ГОСТ 33302-2015⁹, ГОСТ 33271-2015¹⁰, ГОСТ 33820-2016¹¹, ГОСТ 34154-2017¹², ГОСТ 33825-2016¹³ и пр.).

При этом для подтверждения качества и безопасности облученной продукции необходима достоверная информация о поглощенной дозе ионизирующего излучения, верификация облученной продукции по органолептическим показателям, структурной и химической целостности, показателям пищевой ценности, верификация безопасности и пригодности упаковки для целей обработки, подтверждающих безопасность обработки ионизирующим излучением в диапазоне установленных доз облучения, а также верификация облученной продукции по микробиологическим показателям, санитарно-химическим показателям и показателям порчи, подтверждающим достижение целей обработки.

Заключение

Проведённый анализ свидетельствует о том, что в Российской Федерации сохраняется существенный дисбаланс между достигнутым уровнем научно-технических возможностей применения радиационной обработки пищевых продуктов и состоянием её нормативно-правового обеспечения. Отсутствие гигиенических норм, определяющих предельно допустимые дозы облучения для различных категорий продукции, а также недостаточная проработанность методик идентификации и контроля создают риски как для обеспечения санитарно-эпидемиологической безопасности, так и для прозрачности обращения продукции на рынке. Несмотря на наличие международных стандартов (Кодекс Алиментариус, рекомендации ФАО/МАГАТЭ/ВОЗ), общих положений технических регламентов ТС/ЕАЭС и ГОСТ ISO 14470-2014¹⁴, национальная нормативная база остаётся

фрагментарной и не обеспечивает комплексного регулирования процессов радиационной обработки.

Для устранения «пробелов» в регулировании отрасли обработки продукции ионизирующим излучением и повышения уровня доверия со стороны потребителей целесообразно предпринять следующие шаги:

- разработать и утвердить специальные санитарные нормы, определяющие предельно допустимые дозы облучения (см. табл.) для различных категорий продуктов;
- включить радиационную обработку в систему НАССР¹⁵ как критическую контрольную точку с обязательной регистрацией дозиметрических данных;
- разработать методики идентификации продукции, подвергшейся облучению, и внедрить их в практику санитарно-эпидемиологического надзора;
- внедрить систему гигиенического регламентирования, контроля и прослеживаемости со стороны уполномоченного органа.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кузьмин С.В. определил цели и задачи исследования.

Есаурова О.В. разработала дизайн исследования, подготовила окончательный вариант рукописи.

Горина И.Е. подготовила данные для анализа, редактировала промежуточный вариант рукописи.

Мощенская Н.В. провела анализ данных, редактировала промежуточный вариант рукописи.

Водоватов В.А. провел анализ данных, подготовил таблицу, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

⁷ ГОСТ 33339-2015 «Облучение пищевых продуктов. Термины и определения». М.: Стандартинформ, 2015 [GOST 33339-2015 "Irradiation of food products. Terms and definitions". Moscow: Standartinform; 2015 (In Russ.)]

⁸ ГОСТ 33340-2015 «Пищевые продукты, обработанные ионизирующим излучением. Общие положения». М.: Стандартинформ, 2015 [GOST 33340-2015 "Food products treated with ionizing radiation. General provisions". Moscow: Standartinform; 2015 (In Russ.)]

⁹ ГОСТ 33302-2015 «Продукция сельскохозяйственная свежая. Руководство по облучению в целях фитосанитарной обработки». М.: Стандартинформ, 2015 [GOST 33302-2015 "Fresh agricultural products. Guidelines on irradiation for phytosanitary treatment. Moscow: Standartinform; 2015 (In Russ.)]

¹⁰ ГОСТ 33271-2015 «Пряности сухие, травы и приправы овощные. Руководство по облучению в целях борьбы с патогенными и другими микроорганизмами». М.: Стандартинформ, 2015 [GOST 33271-2015 "Dry spices, herbs and vegetable seasonings. Guidelines on irradiation in order to control pathogenic and other microorganisms. Moscow: Standartinform; 2015 (In Russ.)]

¹¹ ГОСТ 33820-2016 «Мясо свежее и мороженое. Руководство по облучению для уничтожения паразитов, патогенных и иных микроорганизмов». М.: Стандартинформ, 2016 [GOST 33820-2016 "Food products treated with ionizing radiation. General provisions". Moscow: Standartinform; 2016 (In Russ.)]

¹² ГОСТ 34154-2017 «Руководство по облучению рыбы и морепродуктов с целью подавления патогенных и вызывающих порчу микроорганизмов». М.: Стандартинформ, 2017 [GOST 34154-2017 "Guidelines on irradiation of fish and seafood in order to suppress pathogenic and spoilage microorganisms." Moscow: Standartinform; 2017 (In Russ.)]

¹³ ГОСТ 33825-2016 «Полуфабрикаты из мяса упакованные. Руководство по облучению для уничтожения паразитов, патогенных и иных микроорганизмов». М.: Стандартинформ, 2016 [GOST 33825-2016 "Packaged meat semi-finished products. Guidelines on irradiation for the destruction of parasites, pathogens and other microorganisms. Moscow: Standartinform; 2016 (In Russ.)]

¹⁴ ГОСТ ISO 14470-2014 «Облучение пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и рутинному контролю процесса». М.: Стандартинформ, 2014 [GOST ISO 14470-2014 "Irradiation of food products. Requirements for the development, validation and routine control of the process." Moscow: Standartinform; 2014 (In Russ.)]

¹⁵ ГОСТ Р ИСО 22000-2019 «Системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Требования к организациям, участвующим в цепи создания пищевой продукции». М.: Стандартинформ, 2019 [GOST R ISO 22000-2019 "Food safety management systems. Requirements for organizations involved in the food production chain." Moscow: Standartinform; 2019 (In Russ.)]

Сведения об источнике финансирования

Исследование проведено в рамках НИР «Обоснование принципов, критериев и методов системы аккредитации центров радиационной обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции, а также товаров народного потребления» (2023-2025 гг.), «Научное обоснование системы гигиенической регламентации качества, безопасности, сертификации и верификации сельскохозяйственного сырья и пищевой продукции, а также товаров народного потребления, прошедших ионизирующую обработку» (2023-2025 гг.).

Литература

1. 21 CFR 179.26. Ionizing radiation for the treatment of food. eCFR / U.S. FDA. Электронный ресурс. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-179/subpart-B/section-179.26> (Дата обращения: 21.11.2025).
2. 7 CFR Part 305. Phytosanitary Treatments (в т.ч. требования к облучению импортируемой продукции). APHIS/USDA. Электронный ресурс. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-7/subtitle-B/chapter-III/part-305?toc=1> (Дата обращения: 21.11.2025).
3. Health Canada / CFIA. Food Irradiation — разрешённые категории и правила маркировки. Government of Canada. Электронный ресурс. URL: <https://inspection.canada.ca/en/food-labels/labelling/industry/irradiated-foods> (Дата обращения 21.11.2025).
4. China National Food Safety Standard GB 14891 «Irradiated Foods» (линейка стандартов GB 14891.x). Beijing: NHC/CFDA. Электронный ресурс. URL: https://www.cfs.gov.hk/english/programme/programme_rf/fs/programme_rafs_ft_01_03_irfood.html (Дата обращения 21.11.2025).
5. China GB 7718 «General Rules for the Labelling of Pre-packaged Foods». Beijing: SAMR (требования маркировки облучённых продуктов). Электронный ресурс. URL: https://www.cfs.gov.hk/english/programme/programme_rf/fs/programme_rafs_ft_01_03_irfood.html (Дата обращения 21.11.2025).
6. Japan Food Sanitation Act и подзаконные акты. Официальные обзоры/разъяснения. Электронный ресурс. URL: <https://www.japaneselawtranslation.go.jp/en/laws/view/3687/en> (Дата обращения 21.11.2025).
7. Directive 1999/3/EC of 22 February 1999 establishing a Community list of foods and food ingredients treated with ionising radiation (OJ L 66, 13.03.1999). Электронный ресурс. URL: <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC023200/> (Дата обращения 21.11.2025).
8. Directive 1999/2/EC of 22 February 1999 on foods and food ingredients treated with ionising radiation (OJ L 66, 13.03.1999). Электронный ресурс. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/3/oj> (Дата обращения 21.11.2025).
9. Commission of the European Communities. Commission Decision 2002/840/EC of 23 October 2002 establishing the list of approved facilities in third countries for the irradiation of foods // Official Journal of the European Communities. 2002. L 287. P. 40.
10. Food Safety Authority of Ireland (FSAI). Foodstuffs treated with ionising radiation — guidance. Dublin: FSAC. Электронный ресурс. URL: <https://www.fsai.ie/enforcement-and-legislation/legislation/food-legislation/manufacturing-and-processing-methods/foodstuffs-treated-with-ionising-radiation> (Дата обращения 21.11.2025).
11. 21 CFR 179.45. Packaging materials for use during the irradiation of prepackaged foods. eCFR / U.S. FDA. Электронный ресурс. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-179/subpart-C/section-179.45> (Дата обращения 21.11.2025).
12. Отчет Международной Консультативной группы ВОЗ/ФАО/МАГАТЭ по облучению пищевых продуктов Codex document CAC. Микробиологическая безопасность облученных пищевых продуктов (The Microbiological Safety of Irradiated Food). Codex Alimentarius Commission, CX/FN/83/9, Rome, 1983. (In English).
13. Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech. Report Ser. 659. Geneva: World Health Organization, 1981.
14. Международная Консультативная группа по облучению пищевых продуктов ВОЗ/ФАО/МАГАТЭ. Микробиологические критерии для пищевой продукции, подлежащей обработке ионизирующими излучением (Consultation on Microbiological Criteria for Foods to be Further Processed by Irradiation), World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1989. (In English).
15. Codex Alimentarius. CODEX STAN 106-1983 (Rev.1-2003) «General Standard for Irradiated Foods». Rome: FAO/WHO. Электронный ресурс. URL: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/tr/?lnk=1&url=https%25A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodenodes%252FCXS%2B106-1983%252FCXS_106e.pdf (Дата обращения: 21.11.2025).
16. Byron D.H., Luckman G.J. Food Environ // Protection Newsletter. 2009. Vol. 12, № 1. P. 4-8.
17. Русаков В.Н., Есаулова О.В. Влияние ионизирующего излучения на химические свойства и пищевую ценность мяса и мясопродуктов. Эрисмановские чтения – 2024. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: материалы II Всероссийского научного конгресса с международным участием. М., 2024. С. 92-93.
18. Русаков В.Н., Есаулова О.В. Действие ионизирующего излучения на липиды в мясе и мясопродуктах. Эрисмановские чтения – 2024. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: материалы II Всероссийского научного конгресса с международным участием. М., 2024. С. 93-94.
19. Русаков В.Н. Применение ионизирующего излучения для обработки пищевой продукции. Тезисы докладов научно-практической конференции «Перспективы дезинфектологии и Актуальные вопросы обработок в современном пищевом производстве». М., 2024. С. 114-116.
20. Есаулова О.В., Русаков В.Н. Экспериментальное изучение эффективности радиационной обработки некоторых видов овощной продукции. Эрисмановские чтения – 2024. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: материалы II Всероссийского научного конгресса с международным участием. М., 2024. С. 38-39.
21. Русаков В.Н., Есаулова О.В. Влияние ионизирующего излучения на витамины в мясе при его радиационной обработке. Эрисмановские чтения – 2024. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: материалы II Всероссийского научного конгресса с международным участием. М., 2024. С. 91-92.
22. Русаков В.Н. Влияние ионизирующего излучения на пищевую ценность продуктов. Тезисы докладов научно-практической конференции «Перспективы дезинфектологии. Актуальные вопросы обработок в современном пищевом производстве». М., 2024. С. 112-114.
23. «Радиационные технологии для пищевой продукции: требования к регламенту обработки, методы идентификации факта облучения, регулирование оборота облученной продукции», опубликованная в сборнике докладов V Международного научного форума «Ядерная наука и технологии», который состоялся 7-11 октября 2024 года в г. Алматы, Казахстан. Электронный ресурс. URL: <https://inp.kz/ru/novost/v-mezhdunarodnyj-nauchnyj-forum-yadernaya-nauka-i-tehnologii?ysclid=mioj2gb1sv838639548> (Дата обращения 24.10.2025).

24. Кузьмин С.В., Русаков В.Н., Есаурова О.В., Сетко А.Г. Безопасность пищевых продуктов, подвергнутых обработке ионизирующими излучениями (обзор литературы) // Здравоохранение Российской Федерации. 2025. Т. 6, № 9(1). С. 60-64.
25. Esaulova O.V., Barvina A.Ya., Moshchenskaya N.V., Rusakov V.N. Ensuring the safety and efficiency of processing food

and agricultural products with ionizing radiation using remote control means. International Youth Forum Russia-Africa: Nuclear education-potential for successful regional development. Conference proceedings. 2025. P. 188-192. ISBN: 978-5-907954-44-1.

Поступила: 29.10.2025

Кузьмин Сергей Владимирович – доктор медицинских наук, профессор, директор Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Адрес для переписки: 141014, Россия, Московская область, Мытищи, ул. Семашко, д. 2; E-mail: fncg@fncg.ru

ORCID: 0000-0002-0209-9732

Есаурова Ольга Владимировна – кандидат экономических наук, руководитель Научно-исследовательского центра радиационных биотехнологий (референс-центр в области радиационных технологий), Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Россия

ORCID: 0009-0007-1936-1673

Горина Ирина Евгеньевна – ведущий специалист Научно-исследовательского центра радиационных биотехнологий (референс-центр в области радиационных технологий) Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; заместитель генерального директора по развитию Малого инновационного предприятия «Научно-производственный центр им. Ф.Ф. Эрисмана», Мытищи, Россия

Мощенская Нина Владимировна – кандидат химических наук, заместитель руководителя Научно-исследовательского центра радиационных биотехнологий (референс-центр в области радиационных технологий) Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, генеральный директор Малого инновационного предприятия «Научно-производственный центр им. Ф.Ф. Эрисмана», Мытищи, Россия

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Для цитирования: Кузьмин С.В., Есаурова О.В., Горина И.Е., Мощенская Н.В., Водоватов А.В. Обоснование подходов к гигиеническому нормированию и контролю радиационной обработки пищевой продукции в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 49–57. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-49-57

Justification of approaches to hygienic rationing and control of radiation treatment of food products in the Russian Federation

Sergey V. Kuzmin¹, Olga V. Esaulova¹, Irina E. Gorina^{1,2}, Nina V. Moshchenskaya^{1,2}, Aleksandr V. Vodovatov^{3,4}

¹ F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow Region, Mytishchi, Russia

² Small Innovative Enterprise “F.F. Erisman Scientific and Production Center”, Tula, Russia

³ 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

⁴ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

The paper considers modern approaches to the use of ionizing radiation to ensure microbiological safety of food products. In international practice, the issues of ensuring radiation safety in the processing of food products by ionizing radiation are well developed. On the contrary, the Russian Federation and the Eurasian

Sergey V. Kuzmin

F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene

Address for correspondence: 2, Semashko Str., Moscow Region, Mytishchi, 141014, Russia; E-mail: fncg@fncg.ru

Economic Union do not have hygienic standards and state control in the field of radiation biotechnologies, as well as special sanitary standards that set maximum permissible radiation doses for various categories of food products. Aim of the study: to analyze domestic and international regulatory documents establishing requirements for radiation treatment of food and agricultural products, in order to develop a set of requirements for hygienic standardization of such products in the Russian Federation. Materials and Methods: The study was based on the analysis of regulatory documents of the IAEA, WHO, and FAO, as well as the national legislation of countries that actively use methods of radiation treatment of food products. Results and Discussion: The analysis of international standards is carried out, and existing gaps in the regulatory framework of the Russian Federation are identified. It is shown that the lack of special sanitary standards and methods for identifying irradiated products complicates control and reduces market transparency. Conclusion: The necessity of developing a system of hygienic rationing and state control to ensure the quality and safety of products treated with ionizing radiation is emphasized.

Key words: *radiation treatment, ionizing radiation, hygienic rationing, microbiological safety, radiation biotechnologies.*

Authors' personal contribution

Sergey V. Kuzmin defined the goals and objectives of the study.

Olga V. Esaulova developed the research design, prepared the final version of the manuscript.

Irina E. Gorina prepared the data for analysis, edited the intermediate version of the manuscript.

Nina V. Moshchenskaya edited an intermediate version of the manuscript.

Aleksandr V. Vodovatov analyzed the data, prepared the table, and edited the intermediate version of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was conducted as part of the research project "Justification of the principles, criteria and methods of the accreditation system of centers for radiation treatment of food and agricultural products, as well as consumer goods "(2023-2025), "Scientific justification of the system of hygienic regulation of the quality, safety, certification and verification of agricultural raw materials and food products, as well as consumer goods that have passed ionizing processing" (2023-2025).

References

1. 21 CFR 179.26 — Ionizing radiation for the treatment of food. eCFR / U.S. FDA. Online resource. Available from: <https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-179/subpart-B/section-179.26> [Accessed November 21, 2025].
2. 7 CFR Part 305-Phytosanitary Treatments (including requirements for irradiation of imported products). APHIS/USDA. Online resource. Available from: <https://www.ecfr.gov/current/title-7 subtitle-B/chapter-III/part-305?toc=1> [Accessed November 21, 2025].
3. Health Canada / CFIA. Food Irradiation — allowed categories and labeling rules. Government of Canada. Online resource. Available from: <https://inspection.canada.ca/en/food-labels/labelling/industry/irradiated-foods> [Accessed November 21, 2025].
4. China National Food Safety Standard GB 14891 "Irradiated Foods" (List of standards GB 14891.x line of standards). Beijing: NHC/CFDA. Online resource. Available from: https://www.cfs.gov.hk/english/programme/programme_rafs/programme_rafs_ft_01_03_irfood.html [Accessed November 21, 2025].
5. China GB 7718 «General Rules for the Labelling of Pre-packaged Foods». Beijing: SAMR (Requirements for labeling Irradiated products). Online resource. Available from: https://www.cfs.gov.hk/english/programme/programme_rafs/programme_rafs_ft_01_03_irfood.html [Accessed November 21, 2025].
6. Japan Food Sanitation Act and subordinate legislation. Official reviews/clarifications. Online resource. Available from: https://www.japaneselawtranslation.go.jp/en/laws/vie_w/3687/en [Accessed November 21, 2025].
7. Directive 1999/3/EC of 22 February 1999 establishing a Community list of foods and food ingredients treated with ionising radiation (OJ L 66, 13.03.1999). Online resource. Available from: <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC023200/> [Accessed November 21, 2025].
8. Directive 1999/2/EC of 22 February 1999 on foods and food ingredients treated with ionising radiation (OJ L 66, 13.03.1999). Online resource. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/3/oj> [Accessed November 21, 2025].
9. Commission of the European Communities. Commission Decision 2002/840/EC of 23 October 2002 establishing the list of approved facilities in third countries for the irradiation of foods. *Official Journal of the European Communities*. 2002. L 287. P. 40.
10. Food Safety Authority of Ireland (FSAI). Foodstuffs treated with ionising radiation — guidance. Dublin: FSAC. Online resource. Available from: <https://www.fsai.ie/enforcement-and-legislation/legislation/food-legislation/manufacturing-and-processing-methods/foodstuffs-treated-with-ionising-radiation> [Accessed November 21, 2025].
11. 21 CFR 179.45 — Packaging materials for use during the irradiation of prepackaged foods. eCFR / U.S. FDA. Online resource. Available from: <https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-179/subpart-C/section-179.45> [Accessed November 21, 2025].
12. Report of the WHO/FAO/IAEA International Advisory Group on Food Exposure Codex document CAC. The Microbiological Safety of Irradiated Food. Codex Alimentarius Commission, CX/FH/83/9. Rome; 1983.
13. Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech. Report Ser. 659. Geneva: World Health Organization; 1981.
14. WHO / FAO / IAEA International Advisory Group on Food Exposure. Consultation on Microbiological Criteria for Foods to be Further Processed by Radiation, World Health Organization, Geneva, Switzerland; 1989.
15. Codex Alimentarius. CODEX STAN 106-1983 (Rev.1-2003) «General Standard for Irradiated Foods». Rome: FAO/WHO. Online resource. Available from: URL: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/tr/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B106-1983%252FCXS_106e.pdf [Accessed November 21, 2025].
16. Byron DH, Luckman GJ. Food Environ. Protection Newsletter. 2009;12(1): 4-8.
17. Rusakov VN, Esaulova OV. Influence of ionizing radiation on the chemical properties and nutritional value of meat and meat products. Erismanov's Readings - 2024. New in Nutrition and Food Hygiene to Ensure the Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population: Materials of the 2nd All-Russian Scientific Congress with International Participation. Publication: Federal Scientific Center of

- Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi; 2024. P. 92-93 (In Russian).
18. Rusakov VN, Esaulova OV. Effect of ionizing radiation on lipids in meat and meat products. Erismanov Readings-2024. Erismanov's Readings - 2024. New In Nutrition and Food Hygiene to Ensure the Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population: Materials of the 2nd All-Russian Scientific Congress With International Participation. Publication: Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi; 2024. P. 93-94 (In Russian).
19. Rusakov VN. Application of ionizing radiation for food processing. Abstracts of reports of the scientific and practical conference "Prospects of disinfection. Actual issues of processing in modern food production": Moscow; 2024. P. 114-116. (In Russian).
20. Esaulova OV, Rusakov VN. Experimental study of the effectiveness of radiation treatment of some types of vegetable products. Erismanov's Readings - 2024. New in Nutrition and Food Hygiene to Ensure the Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population: Materials of the 2nd All-Russian Scientific Congress With International Participation. Publication: Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi; 2024. P. 38-39 (In Russian).
21. Rusakov VN, Esaulova OV. Effect of ionizing radiation on vitamins in meat during its radiation treatment. New in Nutrition and Food Hygiene to Ensure the Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population: Materials of the 2nd All-Russian Scientific Congress with International Participation. Publication: Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi; 2024. P. 91-92. (In Russian).
22. Rusakov VN. Influence of ionizing radiation on the nutritional value of products. Abstracts of reports of the scientific and practical conference "Prospects of disinfection. Actual issues of processing in modern food production": Moscow; 2024. P. 112-114. (In Russian).
23. "Radiation technologies for food products: requirements for processing regulations, methods for identifying the fact of exposure, regulation of the turnover of irradiated products", published in the collection of reports of the V International Scientific Forum "Nuclear Science and Technology", which was held on October 7-11, 2024 in Almaty, Kazakhstan. (Accessed November 21, 2025) (In Russian).
24. Kuzmin SV, Rusakov VN, Esaulova OV, Setko AG. Safety of food products subjected to ionizing radiation treatment (literature review). *Healthcare of the Russian Federation*. 2025;6(9(1)): 60-64. (In Russian).
25. Esaulova OV, Barvina AY, Moshchenskaya NV, Rusakov VN. Ensuring the safety and efficiency of processing food and agricultural products with ionizing radiation using remote control means. International Youth Forum "Russia-Africa: Nuclear Education as a potential for Successful Regional Development". Collection of materials. 2025. P. 188-193. ISBN: 978-5-907954-44-1.

Received: October 29, 2025

For correspondence: **Sergey V. Kuzmin.** Doctor of Medical Sciences, Professor, Director of F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (2, Semashko Str., Moscow Region, Mytishchi, 141014, Russia; E-mail: fncg@fncg.ru)

ORCID: 0000-0002-0209-9732

Olga V. Esaulova – Candidate of Economic Sciences, Head of the Scientific Research Center "Radiation Biotechnologies" of F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Mytishchi, Moscow Region, Russia

ORCID: 0009-0007-1936-1673

Irina E. Gorina – Leader Researcher of the Scientific Research Center "Radiation Biotechnologies" of F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Deputy Head of the Small innovative enterprise "F.F. Erisman Scientific and Production Center", Mytishchi, Moscow Region, Russia

Nina V. Moshchenskaya – Candidate of Chemical Sciences, Deputy Head of the Scientific Research Center "Radiation Biotechnologies", F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Head of the Small innovative enterprise "F.F. Erisman Scientific and Production Center", Mytishchi, Moscow Region, Russia

Aleksandr V. Vodovatov – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

For citation: Kuzmin S.V., Esaulova O.V., Gorina I.E., Moshchenskaya N.V., Vodovatov A.V. Justification of approaches to hygienic rationing and control of radiation treatment of food products in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 49–57. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-49-57

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-58-69

УДК: 616.12-008.1:614.876(470.55)

Сравнительный анализ радиогенного риска заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца и цереброваскулярных заболеваний в когорте работников, подвергшихся хроническому облучению

Мосеева М.Б., Азизова Т.В.

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

Болезни системы кровообращения – ведущая причина смерти во всем мире. Даже небольшая величина радиогенного риска приведет к значительному увеличению числа случаев и смертей, так как число людей, подвергающихся облучению в разных целях, постоянно возрастает. Цель работы – сравнительный анализ радиогенного риска заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца и цереброваскулярных заболеваний в когорте работников Производственного Объединения «Маяк» с использованием нескольких дозиметрических систем. Первый анализ радиогенного риска изучаемых заболеваний/ причин смерти проведен с использованием дозиметрической системы «Дозы-2005», включавшей данные о профессиональном маршруте и дозах внешнего и внутреннего облучения для работников, нанятых на одно из основных производств в период 1948–1972 гг. Следующие дозиметрические системы, «DCRM-2008» и «DCRM-2013», дополнительно включали данные о работниках, нанятых в более поздние годы (1973–1982 гг.). Необходимость уточнения оценок доз внешнего облучения обусловлена тем, что за время мониторинга неоднократно менялись типы используемых дозиметров, не учитывались индивидуальные особенности облучения отдельных работников и так далее, а внутреннего облучения – расхождениями в содержании плутония в отдельных органах/тканях с результатами посмертного анализа аутопсийных образцов. Заключение: Изменения в дозиметрической системе внутреннего облучения от инкорпорированного плутония оказали наиболее значимое влияние на оценку избыточного относительного риска при анализе заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, цереброваскулярные заболевания, радиогенный риск, дозиметрическая система, когорта работников ПО «Маяк».

Введение

В настоящее время изучению влияния ионизирующего излучения на развитие болезней системы кровообращения (БСК) уделяется большое внимание во всем мире. Поскольку БСК – ведущая причина смерти и все большее число людей подвергается облучению в профессиональных, медицинских или иных целях, то даже небольшая величина радиационного риска приведет к значительному увеличению числа случаев и смертей. Известно, что облучение при радиотерапии в высоких дозах может повреждать структуры сердца, однако риск развития БСК после облучения в меньших дозах при медицинских процедурах или при работе с источниками ионизирующего излучения до сих пор неизвестен [1, 2]. Мета-анализ 93 исследований выявил статистически значимо повышенный избыточный относительный риск на 1 Грэй (ИОР/Гр) для всех БСК, равный 0,11 (95 % доверительный интервал (ДИ) 0,08 – 0,14), и, в частности, для ишемической болезни сердца (ИОР/Гр = 0,07; 95 % ДИ 0,05 – 0,10) и цереброваскулярных заболеваний (ИОР = 0,19; 95 % ДИ 0,09 – 0,28), при этом выявлена статистически значимая ($p < 0,05$) гетерогенность между отдельными исследованиями, которая уменьшалась если рассматривались

исследования высокого качества или исследования в области средних или малых доз/мощностей доз [2]. Одной из когорт с высоким качеством данных являлась когорта работников Производственного Объединения (ПО) «Маяк».

Когорта работников ПО «Маяк» – один из важнейших источников информации о радиогенных рисках заболеваний, в том числе БСК. Проведено несколько исследований радиогенного риска заболеваемости и смертности от БСК, прежде всего ишемической болезни сердца (ИБС, 410 – 414 коды МКБ-9) и цереброваскулярных заболеваний (ЦВЗ, 430 – 438 коды МКБ-9), в этой когорте с использованием различных дозиметрических систем. Впервые радиогенный риск заболеваемости и смертности от болезней системы кровообращения был изучен в когорте работников ПО «Маяк», впервые нанятых на работу на один из основных заводов (реакторный, радиохимический или плутониевое производство) в 1948 – 1958 гг. – в период становления предприятия, характеризовавшийся наиболее неблагоприятной радиационной обстановкой на всех заводах. Далее происходило поэтапное расширение изучаемой когорты путем включения работников, нанятых в более поздние годы и подвергшихся облучению в гораздо меньших дозах с расширением периода наблюдения и улучшением индивидуальных оценок доз профессионального облучения.

Мосеева Мария Борисовна

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

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

Цель исследования – сравнительный анализ риска заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ в когорте работников ПО «Маяк», подвергшихся хроническому облучению, с использованием нескольких дозиметрических систем.

Дозиметрические системы для когорты работников ПО «Маяк»

Известно, что дозиметрический контроль внешнего облучения у работников ПО «Маяк» осуществлялся с начала производства, в то время как регулярный контроль внутреннего облучения – лишь с конца 1960-х годов [3]. Результаты данного мониторинга послужили основой для создания дозиметрической системы для работников ПО «Маяк» в рамках совместного российско-американского проекта, одобренного «Объединенным координационным комитетом по изучению последствий радиационных воздействий» [4]. На основе данных профессионального маршрута были идентифицированы работники производств, уточнены условия труда и истории облучения, а также проведена работа по ревизии и реконструкции доз внешнего и внутреннего облучения. Первый анализ риска БСК в когорте работников

ПО «Маяк» был проведен с использованием дозиметрической системы «Дозы-2005» [5–7], включавшей данные о профессиональном маршруте и дозах облучения для работников, нанятых на одно из основных производств (реакторное, радиохимическое и химико-металлургическое) в период 1948–1972 гг. Последующие дозиметрические системы для работников ПО «Маяк» – «ДСРМ-2008» [7–9] и «ДСРМ-2013» [7, 10] – включали также работников основных производств, нанятых в более поздние годы (1973–1982 гг.), и работников вспомогательных производств (ремонтно-механический завод, завод водоподготовки и т.д.), нанятых в период 1948–1982 гг. Во всех дозиметрических системах женщины составляли более 25 % работников. Сравнение дозиметрических систем, использованных при анализе радиогенного риска БСК, представлено в таблице 1.

Следует отметить, что к настоящему времени доступны дозиметрические системы «ДСРМ-2016» и «ДСРМ-2019» [7], но эти системы не были использованы при анализе радиогенного риска БСК в когорте работников ПО «Маяк», поэтому в настоящей работе не рассматриваются.

Дозиметрические системы, использованные в анализе риска БСК в когорте работников ПО «Маяк» в хронологическом порядке, и их основные характеристики

Таблица 1

Dosimetry systems used in the analyses of circulatory diseases radiation risks in the cohort of Mayak PA workers chronologically and their main characteristics

Table 1

Характеристика дозиметрической системы [Characteristic of the dosimetry systems]	«Дозы-2005» [5–7, 9] [«Doses-2005» [5–7, 9]]	«ДСРМ-2008» [7–9] [«MWDS-2008» [7–9]]	«ДСРМ-2013» [7, 10] [«MWDS-2013» [7, 10]]
Число работников, включенных в дозиметрическую систему [Number of workers included into dosimetry system]	18831	25940	25757
Период найма работников [Period of workers' hire]	1948–1972	1948–1982	
Работники основных производств [Workers at main plants]	100 %	86 %	87 %
Женщины [Females]	25,3 %	25,4 %	
Внешнее облучение [External exposure]			
Число сценариев облучения [Number of exposure scenarios]	19	115	
Ученные факторы [Factors taken into account]	характеристики спектров излучений [characteristics of radiation spectrums] энергетическая и угловая зависимость ответов дозиметров [energy and angular dependencies of dosimeter response] положение работника относительно источника ионизирующего излучения [a worker's position relatively ionizing radiation source] конфигурация (геометрия) и энергия радиационного поля [configuration (geometry) and energy of radiation field] штатное/нештатное облучение [routine/non-routine exposure]		

Окончание таблицы 1

Характеристика дозиметрической системы [Characteristic of the dosimetry systems]	«Дозы-2005» [5–7, 9] [«Doses-2005» [5–7, 9]]	«DCRM-2008» [7–9] [«MWDS-2008» [7–9]]	«DCRM-2013» [7, 10] [«MWDS-2013» [7, 10]]
Работники без архивных записей показаний дозиметров, для которых была реконструирована доза облучения [Workers without archival records of dosimeter measurements, for whom radiation dose was reconstructed]		16 %	20 %
Работники с оценкой дозы от нейтронного излучения [Workers with neutron dose estimates]	–		18 %
Работники с оценками доз медицинского диагностического облучения [Workers with medical diagnostic exposure dose estimates]	–	85 % работников основных производств [85 % of workers at main plants]	
Неопределенность доз облучения [Exposure dose uncertainty]	минимум – максимум [minimum – maximum]	95 % ДИ [95 % CI]	подход множественных дозовых реализаций [multiple dose realizations approach]
Внутреннее облучение [Internal exposure]			
Число или доля обследованных работников [Number or portion of monitored workers]	7217	32 % работников основных производств [32 % workers at main plants]	8043
Модель дыхательного тракта [Respiratory tract model]	модифицированная МКРЗ-66 (учет влияния курения и дисперсности) [Adapted ICRP-66 (smoking and dispersion taken into account)]	модифицированная МКРЗ-66 (учет перехода плутония из паренхиматозной ткани легких в лимфатические узлы, обновленный подход к учету влияния курения на задержку соединений плутония в легких) [Adapted ICRP-66 (plutonium transfer from lung parenchymatous tissue into lymph nodes, updated approach to taking smoking effect on plutonium compounds' retention in lungs into account)]	модифицированная МКРЗ-66 (Байесовский подход) [Adapted ICRP-66 (Bayes approach)]
Биокинетическая модель плутония [Biokinetic plutonium model]	Системная модель [Systemic model]	Модифицированная МКРЗ-67 [Adapted ICRP-67]	Модель Леггетта [Leggett's model]
Модель желудочно-кишечного тракта [Gastro-intestinal tract model]	4-камерная модель МКРЗ-30 (резорбция зависит от транспортабельности) [Four-compartment ICRP-30 (absorption depends on transportability)]	МКРЗ-30 [ICRP-30]	
Режим ингаляционного поступления [Inhalation intake]	индивидуальный, изменяющийся во времени с учетом профессионального маршрута [individual, changing with time accounting for occupational history]	хроническое, экспоненциально снижающееся со временем [chronic, exponentially decreasing with time]	трехступенчатая функция [three-step function]
Взвешивающие тканевые коэффициенты [Weighting tissue coefficients]	МКРЗ-74 [ICRP-74]	МКРЗ-103 [ICRP-103]	
Оценки неопределенности доз [Dose uncertainty estimates]	–	95 % ДИ [95 % CI]	подход множественных дозовых реализаций [multiple dose realization approach]

Дозиметрия внешнего облучения

Несмотря на то, что дозы внешнего облучения работников ПО «Маяк» измерялись с помощью индивидуальных дозиметров с начала производства, результаты измерений характеризовали дозу с большой неопределенностью [3]. Причины заключались в том, что за время мониторинга неоднократно менялись типы дозиметров, стандарты и единицы измерения доз облучения, принципы нормирования облучения, не учитывались индивидуальные особенности облучения отдельных работников, в первые годы работы предприятия не оценивались дозы от некоторых радиационных факторов, например, нейтронного облучения. В связи с этим, работа по уточнению оценок индивидуальных доз внешнего облучения, измеренных с помощью плёночных дозиметров, включала: определение сценариев облучения для больших групп работников, работавших в одинаковых условиях труда; описание спектров излучений на рабочих местах, которые представляют собой смесь гамма-, бета- и нейтронного излучений; изучение и расчет поправок на энергетическую и угловую зависимости ответов дозиметров, использованных в разные годы деятельности предприятия; учет положения тела работника относительно источника ионизирующего излучения при выполнении рабочих операций; конфигурацию (геометрию) и энергию радиационного поля; разделение штатного (рутинного) и нештатного облучения; разработка алгоритмов реконструкции индивидуальной дозы облучения при отсутствии измерений.

Окончательные оценки доз внешнего облучения, представленные в рамках дозиметрической системы «Дозы-2005» на 18 органов, представляли собой точечную оценку и диапазон (минимум и максимум) для каждого работника за каждый год найма. Для 16 % работников, у которых отсутствовали индивидуальные измерения, дозы внешнего облучения были реконструированы.

В системе «DCRM-2008» было увеличено число сценариев облучения (до 115), а также доля работников без архивных записей показаний дозиметров, для которых была реконструирована доза облучения. Для 18 % работников предоставлены дозы от воздействия нейтронного излучения, а для 85 % работников основных производств – дозы медицинского диагностического облучения. Окончательные оценки доз внешнего облучения, предоставленные в рамках дозиметрической системы «Дозы-2008» также на 18 органов, представляли собой точечную оценку и 95 % ДИ для каждого работника за каждый год найма. При сравнении доз внешнего гамма-излучения, оцененных для работников с помощью дозиметрических систем «Дозы-2005» и «DCRM-2008», установлено, что улучшения привели к тому, что возросла доля работников, подвергшихся облучению в малых дозах (до 0,5 Гр) [11].

Поскольку с 2010 года работа по оценке доз внешнего облучения проходила без участия представителей ПО «Маяк» преимущественно методом обратного инжиниринга [7, 12], то в рамках разработки дозиметрии внешнего облучения «DCRM-2013» была только разработана гипермодель для оценки неопределенностей доз внешнего облучения методом множественных реализаций.

Дозиметрия внутреннего облучения

Следует отметить, что проблема внутреннего облучения персонала ПО «Маяк» фактически сводилась к реше-

нию задач дозиметрии инкорпорированного плутония, поскольку согласно анализу аутопсийных образцов дозы облучения от радиоактивных продуктов деления урана были на несколько порядков ниже [6, 13]. Внутреннему облучению от инкорпорированного плутония подвергались работники радиохимического и плутониевого заводов. К сожалению, только часть этих работников прошла биофизическое обследование на измерение активности плутония в биологических субстратах (моче) и для еще меньшего числа работников доступны прямые измерения концентрации плутония в органах и тканях, полученных при аутопсии. Следует отметить, что в течение своей профессиональной деятельности работники ПО «Маяк» подвергались преимущественно ингаляционному воздействию аэрозолей плутония различного типа и состава.

Дозиметрическая система внутреннего облучения «Дозы-2005» представляла собой комбинацию адаптированной модели дыхательного тракта Публикации № 66 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ-66), учитывающей влияние курения и дисперсности промышленных соединений плутония на легочный клиренс, и модифицированной модели системного обмена соединений плутония Публикации № 67 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ-67) с дополнительными камерами в печени и крови [5–7, 9]. Также был учтен ряд факторов, которые влияли на оценку дозы внутреннего облучения: история облучения (ритм ингаляционного поступления, учет нештатных/аварийных ситуаций), частота и методы биофизических обследований, растворимость/транспортабельность соединений, состояние здоровья работника, проведение хелатотерапии и другие. Следует отметить, что в число 7217 индивидуумов, обеспеченных биофизическими анализами, не включены 501 человек, подвергшихся воздействию в нештатных ситуациях, либо с плохо документированной историей ингаляционного облучения, либо с раневым поступлением [13].

Однако при сравнении оценки содержания плутония, рассчитанного по дозиметрической системе «Дозы-2005» на основе измерений альфа-активности в биологических субстратах (моче), с содержанием плутония, определенным по аутопсийным образцам, у одного и того же работника наблюдались большие расхождения в содержании в легочных лимфатических узлах независимо от показателя транспортабельности соединений плутония и содержания во всем организме для нерастворимых форм плутония [5, 7, 9]. Поэтому дозиметрическая система «Дозы-2005» нуждалась в доработке.

Новая биокинетическая модель «DCRM-2008» состояла из системной модели и модели желудочно-кишечного тракта аналогично «Дозы-2005», а также улучшенной модели дыхательного тракта, учитывающей переход плутония из паренхиматозной ткани в лимфатические узлы и обновленный подход к учету влияния курения на задержку соединений плутония в легких [7, 9, 14]. Последнее связано с тем фактом, что у работников без заболеваний легких, плутоний равномерно распределялся между паренхиматозной тканью и лимфатическими узлами легких. Нерастворимые соединения плутония задерживались в тканях легких, а не в системных тканях, независимо от факта курения или заболевания легких. Однако у курильщиков без заболеваний легких менее растворимые соединения плутония в большей степени задерживались в легочной ткани. У работников с забо-

леваниями легких курение не влияло на задержку соединений плутония любой растворимости.

Измерения биологических субстратов, выполненные в течение 12 месяцев до даты смерти, как правило, не учитывались при расчетах доз внутреннего облучения «DCRM-2008», так как на экскрецию плутония с мочой могло повлиять состояние здоровья работника, тем не менее некоторые из таких измерений были использованы с пометкой «терминальные» поскольку отсутствовали другие надёжные измерения. Также было выявлено 653 работника (383 из них работники основных заводов), подвергшихся нештатному облучению, для таких работников дозы внутреннего облучения не рассчитывались.

Следует отметить, что при расчете доз от внутреннего альфа-излучения в «DCRM-2008» тем измерениям активности плутония в суточной порции мочи, которые были ниже порога принятия решения, рассчитанного в соответствии со стандартом [15], присваивалось значение, равное половине порога принятия решения на момент проведения биофизического исследования. Таким образом, в конечном итоге, доза внутреннего облучения могла быть занижена или завышена. В связи с этим, в «DCRM-2008» для каждого члена когорты, для которого оценивалась доза внутреннего облучения, было введено понятие «валидности», которое представляло собой отношение числа измерений выше порога принятия решения к общему числу измерений и варьировало от 0 до 1.

При сравнении доз внутреннего облучения, оцененных для работников с помощью дозиметрических систем «Дозы-2005» и «DCRM-2008», было установлено, что улучшение привело к тому, что у некоторых работников оценки дозы снизились, а у некоторых наоборот возросли [11], что было связано не только с изменениями в дозиметрической системе, но уточнениями в профессиональном маршруте работников.

Следующая дозиметрическая система «DCRM-2013» для оценки доз внутреннего облучения от инкорпорированного плутония при его ингаляционном поступлении, названная PANDORA, подробно представлена в специальном выпуске журнала Radiation Protection Dosimetry [10]. В PANDORA использован Байесовский подход к определению поступления плутония на основе исследования образцов мочи, учитывающий как неопределенности индивидуальных измерений, так и неопределенности моделей и их параметров. Большое внимание уделено поведению частиц плутония в легких, в частности переходу в химически связанные фракции в легких, поскольку наличие связанного плутония в течение длительного времени увеличивает дозу на легкие, особенно если это происходит в области бронхов и бронхиол. Доза облучения легких также обуславливается клиренсом частиц, который происходит посредством двух конкурирующих процессов, – физический перенос частиц в желудочно-кишечный тракт/лимфоузлы и переход в системные ткани при растворении частиц в легочной жидкости и переходом в кровь (абсорбция). В результате изучения результатов отбора проб воздуха, персональных биофизических обследований и данных аутопсии была разработана трехсту-

пенчатая функция, описывающая условия облучения в течение времени на ПО «Маяк», которая сопоставлялась с профессиональным маршрутом для определения актуального «сценария» для данного работника. Для описания системного обмена плутония доктором Р. Леггеттом была разработана модель, в которой были учтены основные слабые стороны модели МКРЗ, такие как недооценка содержания плутония в печени в ранние и промежуточные сроки после поступления, связанные с недооценкой поступления в кровоток и скорости экскреции с калом, а также включение нереалистичного пути перемещения плутония в мочевой пузырь и слишком упрощенного представления о перемещении плутония в печени вскоре после депонирования [16, 17]. Также были внесены еще ряд изменений, но авторы «DCRM-2013» по внутренней дозиметрии отмечают, что главное отличие системы состояло в учете в явном виде неопределенностей параметров моделей (вероятностные распределения), тогда как в предыдущих исследованиях параметры моделей были дискретными, поэтому на выходе получаются распределения доз облучения, а не одно значение.

В отличие от «DCRM-2008», в которой тем измерениям активности плутония в суточной порции мочи, которые были ниже порога принятия решения, присваивалось значение, равное половине порога принятия решения на момент проведения биофизического исследования (точечная оценка), в «DCRM-2013» учитывалась неопределенность, связанная с измерениями. Предполагалось, что каждое измерение активности плутония в суточной порции распределено логнормально около истинного значения и имеет классическую неопределенность. Если измеренная величина оказывалась ниже ожидаемой, тогда этому измерению присваивалось значение порога принятия решения на момент проведения биофизического исследования.

При сравнении оценок доз внутреннего облучения, рассчитанных согласно «DCRM-2008» и «DCRM-2013», в целом отмечается, что медианное значение суммарной дозы, поглощённой в легких, возросло в 1,8 раз, тогда как в системных органах уменьшилось в 1,3 – 1,4 раза [18]. При сравнении случаев с идентичными исходными данными медианное значение суммарной дозы, поглощённой в легких, возросло в 2,1 раза, тогда как в системных органах уменьшилось на 8 – 13%, однако, если вместе с этим учтены только те измерения активности плутония в биосубстратах (моче), которые выше порога принятия решения, то медианная суммарная доза на легкое увеличилась в 2,7 раз, а соответствующая доза на системные органы увеличилась на 6 – 12%.

В результате проведенной работы в рамках разработки дозиметрических систем внутреннего облучения кроме активности в органах/тканях доступны оценки доз внутреннего облучения от инкорпорированного плутония (на 13 органов/тканей в системе «Дозы-2005» и «DCRM-2008» и 17 органов/тканей в «DCRM-2013»).

Сравнение оценок радиогенного риска ИБС и ЦВЗ в когорте работников ПО «Маяк»

В таблице 2 представлена характеристика когорт работников основных производств ПО «Маяк», в которых был оценен риск заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ.

**Характеристика когорт работников основных производств ПО «Маяк»,
в которых был оценен риск заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ**

Table 2

**Characteristics of the worker cohorts of the main Mayak PA facilities
for which incidence and mortality risks for ischemic heart disease and cerebrovascular diseases were estimated]**

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Ссылка [Reference]	Период найма [Period of hire]	Число работников [Number of workers]	Средняя суммарная поглощенная доза, Гр [Mean total absorbed dose, Gy]			
				внешнего гамма-излучения* [external gamma-rays*]		внутреннего альфа-излучения (печень) [internal alpha-particle radia- tion (liver)]	
				M [M] **	Ж [F] **	M [M] **	Ж [F] **
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19, 20]	1948 – 1958	12210	0,91	0,65	0,40	0,81
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21, 22]	1948 – 1972	18763	0,66	0,52	0,26	0,56
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11, 23, 24]	1948 – 1972	18856	0,62	0,51	0,27	0,53
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[25, 26]	1948 – 1982	22377	0,54	0,44	0,23	0,44
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[27–29]	1948 – 1982	22377	0,45	0,37	0,18	0,40

*В печени в исследованиях [27–29] [In liver in studies [27–29]].

** М – мужчины, Ж – женщины [“M” stands for males, “F” stands for females].

**Оценки риска в зависимости от дозы
внешнего облучения**

В таблице 3 представлены оценки ИОР на единицу поглощенной дозы от внешнего гамма-излучения для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ в когорте работников ПО «Маяк». Первое исследование риска заболеваемости и смертности от БСК проведено на основе дозиметрической системы «Дозы-2005» в когорте работников, нанятых на одно из основных производств ПО «Маяк» в период 1948–1958 гг. и наблюдавшихся с момента найма по 2000 г. [19, 20]. Статистически значимый возрастающий линейный тренд с дозой от внешнего гамма-излучения был установлен только для заболеваемости ИБС и ЦВЗ. Расширение когорты путем включения работников, нанятых в период 1959–1972 гг., и периода наблюдения по 2005 г. не оказало существенного влияния на полученные оценки ИОР/Гр при использовании той же дозиметрической системы «Дозы-2005» [21, 22].

При переходе на дозиметрическую систему «DCPM-2008» в когорте работников, нанятых в период 1948–1972 гг. и наблюдавшихся до конца 2005 г., наблюдалось увеличение оценок ИОР/Гр от 33 % до 78 % для заболеваемости ИБС и ЦВЗ и смертности от ЦВЗ и уменьшение на 38 % для смертности от ИБС, но при этом наблюдалось увеличение их неопределенностей по сравнению с соответствующими оценками, полученным при использовании системы «Дозы-2005» [11]. В исследовании [23, 24] этой же когорты работников ПО «Маяк» с тем же периодом наблюдения до конца 2005 г. человеко-годы наблюдения до 1960 г. были исключены из анализа риска заболеваемости ИБС и ЦВЗ. Обусловлено это было тем предположением, что, возможно, наблюдавшийся рост заболеваемости до 1960 г.

был связан с улучшением диагностики этих заболеваний в 1950-е годы и выявлялись не диагностированные ранее случаи. Было установлено, что у мужчин риск заболеваемости и смертности от ИБС статистически значимо возрастал с дозой внешнего облучения независимо от периода лагирования, тогда как у женщин риск заболеваемости становился статистически значимым только при периоде лагирования 30 лет, а риск смертности от ИБС был статистически незначим [23]. Несмотря на то, что полученные оценки ИОР/Гр для заболеваемости и смертности от ЦВЗ [24] были ниже, чем в предыдущем исследовании [11], их ДИ перекрывались.

На следующем этапе исследований когорта работников ПО «Маяк» была расширена и дополнительно включала работников, нанятых в период 1973–1982 гг., а также расширен период наблюдения до конца 2008 г. [25, 26]. Это привело лишь к небольшому увеличению оценки ИОР/Гр для заболеваемости ИБС и ЦВЗ, в целом оценки согласовывались с полученными ранее результатами.

Во всех исследованиях, рассмотренных выше, при изучении влияния внешнего облучения на оценки риска была использована доза на весь организм. Лишь в исследованиях [27–29], результаты которых были опубликованы в 2022 и 2023 гг., была использована доза от внешнего гамма-излучения, поглощенная в печени (аналогично исследованию влияния внутреннего облучения на риск БСК), рассчитанная по дозиметрической системе «DCPM-2013». В этих исследованиях также был расширен период наблюдения на 10 лет, что позволило увеличить число изучаемых случаев и смертей. В целом, можно констатировать, что оценки риска для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ и их неопределенности существенно не изменились.

Таблица 3

Сравнение оценок ИОР на 1 Гр внешнего облучения для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ в когорте работников основных производств ПО «Маяк», полученных с помощью нескольких дозиметрических систем

[Table 3]

Comparison of excess relative risk per 1 Gy of external exposure estimated for incidence of and mortality from ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the worker cohort of the Mayak PA main facilities based on several dosimetry systems]

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Ссылка [Reference]	Орган [Organ]	Период наблюдения [Follow-up period]	Число случаев/смертей [Number of cases/deaths]*	ИОР/Гр (95 % ДИ), период лагирования 10 лет [ERR/Gy (95 % CI), lag period of 10 years]*
Заболеваемость ИБС [IHD incidence]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19]	организм [organism]	1948 – 2000	3716	0,119 (0,051 – 0,186)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[22]	организм [organism]	1948 – 2005	6085	0,114 (0,053 – 0,175)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	организм [organism]	1948 – 2005	6187	0,160 (0,089 – 0,230)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[23]	организм [organism]	1961 – 2005	M[M]: 3888 Ж[F]: 1721	M[M]: 0,11 (0,05 – 0,19) Ж[F]: 0,05 (-0,04 – 0,15)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[26]	организм [organism]	1948 – 2008	7186	0,14 (0,08 – 0,21)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[27]	печень [liver]	1948 – 2018	7722	0,19 (0,12 – 0,26)
Заболеваемость ЦВЗ [CVD incidence]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[20]	организм [organism]	1948 – 2000	4391	0,449 (0,338 – 0,559)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21]	организм [organism]	1948 – 2005	7266	0,397 (0,303 – 0,491)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	организм [organism]	1948 – 2005	7403	0,529 (0,415 – 0,642)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[24]	организм [organism]	1961 – 2008	7174	0,39 (0,31 – 0,46)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[25]	организм [organism]	1948 – 2008	7931	0,49 (0,39 – 0,60)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[28]	печень [liver]	1948 – 2018	9469	0,39 (0,31 – 0,48)
Смертность от ИБС [IHD mortality]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19]	организм [organism]	1948 – 2000	1493	0,066 (-0,018 – 0,149)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[22]	организм [organism]	1948 – 2005	2628	0,061 (-0,011 – 0,133)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	организм [organism]	1948 – 2005	2557	0,038 (-0,033 – 0,109)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[23]	организм [organism]	1948 – 2005	M[M]: 2083 Ж[F]: 469	M[M]: 0,09 (0,02 – 0,16) Ж[F]: 0,00 (-0,12 – 0,15)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[26]	организм [organism]	1948-2008	2848	0,05 (-0,01 – 0,13)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[29]	печень [liver]	1948-2018	3481	0,04 (-0,02 – 0,11)
Смертность от ЦВЗ [CVD mortality]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[20]	организм [organism]	1948 – 2000	752	-0,018 (-0,115 – 0,079)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21]	организм [organism]	1948 – 2005	1494	0,036 (-0,057 – 0,130)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	организм [organism]	1948 – 2005	1382	0,064 (-0,042 – 0,170)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[24]	организм [organism]	1948 – 2008	1551	0,03 (-0,04 – 0,10)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[25]	организм [organism]	1948 – 2008	1567	0,05 (-0,03 – 0,16)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[29]	печень [liver]	1948 – 2018	1808	0,03 (-0,05 – 0,13)

* М – мужчины, Ж – женщины [“M” stands for males, “F” stands for females].

Оценки риска в зависимости от дозы внутреннего облучения

Поскольку в настоящее время неизвестно, дозу на какой орган использовать при анализе влияния внутреннего облучения на риск развития БСК, при анализе данных на когорту работников ПО «Маяк» была использована доза от внутреннего альфа-излучения, поглощенная в печени. Доза на печень была выбрана в качестве суррогата дозы на мышцы, которая в свою очередь, вероятно, будет соответствовать дозе на кровеносные сосуды и камеры сердца. Несмотря на то, что дозы на печень и мышцы различаются, они сильно коррелируют друг с другом, поэтому доза на печень может быть использована для анализа зависимости доза-ответ при исследовании риска развития БСК от дозы внутреннего облучения от инкорпорированного плутония.

В таблице 4 представлены результаты анализа ИОР для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ на 1 Гр дозы от внутреннего альфа-излучения, поглощенной в печени, в когорте работников ПО «Маяк» с использованием нескольких дозиметрических систем. Как видно из таблицы 4, достаточно убедительные доказательства получены в отношении влияния внутреннего облучения на заболеваемость от ЦВЗ [11, 20, 21, 25, 28]. Независимо от используемой дозиметрической системы, оценка ИОР/Гр была статистически значимо выше нуля, а при использовании «ДСРМ-2008» и «ДМРС-2013» была близка к величине соответствующей оценки, полученной при анализе влияния внешнего облучения. Не выявлено статистически значимого влияния внутреннего, также как и внешнего, облучения на смертность от ЦВЗ [11, 20, 21, 25, 28].

Сравнение оценок ИОР на 1 Гр внутреннего альфа-излучения для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ в когорте работников основных производств ПО «Маяк», полученных с помощью нескольких дозиметрических систем

Таблица 4

[Table 4]

Comparison of excess relative risk per 1 Gy of internal exposure estimated for incidence of and mortality from ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the worker cohort of the Mayak PA main facilities based on several dosimetry systems]

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Ссылка [Reference]	Орган [Organ]	Период наблюдения [Follow-up period]	Число случаев/смертей [Number of cases/deaths]*	ИОР/Гр (95 % ДИ), период лагирования 10 лет [ERR/Gy (95 % CI), lag period of 10 years]*
Заболеваемость ИБС [IHD incidence]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19]	печень [liver]	1948 – 2000	2318	0,062 (0,026 – 0,099)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[22]	печень [liver]	1948 – 2005	3740	0,035 (-0,020 – 0,091)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	печень [liver]	1948 – 2005	3513	0,043 (-0,039 – 0,124)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[23]	печень [liver]	1961 – 2005	3089	-0,02 (-0,07 – 0,09)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[26]	печень [liver]	1948 – 2008	3998	0,10 (0,01 – 0,22)
«ДСРМ-2013» [«MWDS-2013»]	[27]	печень [liver]	1948 – 2018	4868	0,14 (0,04 – 0,28)
Заболеваемость ЦВЗ[CVD incidence]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[20]	печень [liver]	1948 – 2000	2847	0,330 (0,174 – 0,487)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21]	печень [liver]	1948 – 2005	4605	0,228 (0,104 – 0,351)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	печень [liver]	1948 – 2005	4466	0,495 (0,293 – 0,698)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[25]	печень [liver]	1948 – 2008	4842	0,46 (0,27 – 0,70)
«ДСРМ-2013» [«MWDS-2013»]	[28]	печень [liver]	1948 – 2018	6093	0,32 (0,16 – 0,51)
Смертность от ИБС [IHD mortality]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19]	печень [liver]	1948 – 2000	510	0,382 (0,072 – 0,691)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[22]	печень [liver]	1948 – 2005	946	0,348 (0,085 – 0,610)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	печень [liver]	1948 – 2005	778	0,400 (0,081 – 0,718)

Окончание таблицы 4

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Ссылка [Reference]	Орган [Organ]	Период наблюдения [Follow-up period]	Число случаев/смертей [Number of cases/deaths]*	ИОР/Гр (95 % ДИ), период лагирования 10 лет [ERR/Gy (95 % CI), lag period of 10 years]*
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[23]	печень [liver]	1948 – 2005	1353	0,08 (-0,03 – 0,26)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[26]	печень [liver]	1948 – 2008	937	0,38 (0,12 – 0,75)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[29]	печень [liver]	1948 – 2018	1441	0,20 (-0,01 – 0,47)
Смертность от ЦВЗ [CVD mortality]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[20]	печень [liver]	1948 – 2000	215	0,191 (-0,153 – 0,535)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21]	печень [liver]	1948 – 2005	513	0,231 (-0,084 – 0,546)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	печень [liver]	1948 – 2005	418	0,137 (-0,190 – 0,464)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[25]	печень [liver]	1948 – 2008	520	0,17 (н/о / н/а – 0,56)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[29]	печень [liver]	1948 – 2018	723	-0,03 (н/о / н/а – 0,26)

* Н/о – «не определен» [“n/a” stands for “not available”].

Изменения, вносимые в дозиметрическую систему внутреннего облучения, наибольшее влияние оказали на величину оценки ИОР/Гр для заболеваемости и смертности от ИБС. При исследовании когорты работников, нанятых в период 1948–1958 гг. и наблюдавшихся до конца 2000 г., на основе дозиметрической системы «Дозы-2005» установлен ИОР/Гр статистически значимо выше нуля как для заболеваемости, так и для смертности от ИБС [19]. При расширении когорты и периода наблюдения, при использовании той же дозиметрической системы «Дозы-2005» величина оценки ИОР/Гр для заболеваемости ИБС снизилась в два раза и стала статистически незначимой, тогда как величина риска для смертности от ИБС практически не изменилась [22] и оставалась на том же уровне при использовании системы «DCPM-2008» [11, 26], за исключением исследования [23]. При использовании оценок доз внутреннего облучения «DCPM-2013» установлен ИОР/Гр для заболеваемости [27], но не смертности от ИБС [29], статистически значимо выше нуля, при этом величины оценок ИОР/Гр для заболеваемости ИБС были близки при анализе в зависимости от дозы внешнего и внутреннего облучения.

Исследование влияния валидности оценки дозы внутреннего облучения в «DCPM-2008» оказалось некоторое влияние на величину оценки ИОР/Гр заболеваемости ИБС и ЦВЗ (для смертности не проводилось в виду небольшого числа случаев), но исключение работников, у которых имелись измерения активности плутония в биосубстрате ниже порога принятия решения, приводило к значительному увеличению неопределенности полученных оценок риска. При анализе риска заболеваемости ИБС и ЦВЗ с использованием системы «DCPM-2013», оценки ИОР/Гр с учетом валидности не проводились.

Заключение

Данные на когорту работников ПО «Маяк» – бесценный источник знаний о влиянии хронического профессионального облучения на развитие БСК. Регулярный мониторинг

уровней внешнего, а позднее и внутреннего облучения работников на ПО «Маяк» позволил накопить, а также регулярно обновлять и улучшать массив индивидуальных доз. Проведенный сравнительный анализ в когорте работников ПО «Маяк» выявил ИОР на 1 Гр внешнего гамма-излучения статистически значимо выше нуля для заболеваемости ИБС и ЦВЗ независимо от используемой дозиметрической системы. При анализе внутреннего облучения статистически значимый ИОР/Гр получен также только для заболеваемости ЦВЗ, но не для смертности от ЦВЗ. Однако при анализе влияния внутреннего облучения на заболеваемость и смертность от ИБС отмечено влияние на оценку ИОР/Гр используемой дозиметрической системы, а также расширение когорты и периода наблюдения. Следует отметить, что величины соответствующих оценок ИОР для заболеваемости ИБС и ЦВЗ на 1 Гр внешнего и внутреннего облучения, полученные при использовании «DCPM-2008» и «DCPM-2013», были близки.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Мосеева М.Б. – написание текста статьи, анализ и интерпретация литературных данных.

Азизова Т.В. – разработка концепции, осуществление общего научного руководства исследованием, утверждение окончательного варианта рукописи.

Благодарности

Авторы признательны Банниковой М.В., научному сотруднику Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики ФМБА России, за консультации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта от 6 июня 2024 г. №11.313.24.2 с Федеральным медико-биологическим агентством «Оценка эффектов хронического облучения и изучение их патогенеза для совершенствования медицинского обеспечения персонала и населения, подвергшихся радиационному воздействию».

Литература

1. Стюарт Ф.А., Аклеев А.В., Хауэр-Дженсен М. и др. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты. Челябинск: Книга, 2012. 384 с.
2. Little M.P., Azizova T.V., Richardson D.B. et al. Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis // British Medical Journal. 2023. Vol. 380. DOI:10.1136/bmj-2022-072924
3. Василенко Е.К. Дозиметрия внешнего облучения работников ПО «Маяк»: приборы, методы, результаты контроля. Озерск: б.и., 2009. С. 51–100.
4. Koshurnikova N.A., Shilnikova N.S., Okatenko P.V. et al. Characteristics of the cohort of workers at the Mayak nuclear complex // Radiation Research. 1999. Vol. 152, № 4. P. 352–363.
5. Vasilenko E.K., Khokhryakov V.F., Miller S.C. et al. Mayak worker dosimetry study: an overview // Health Physics. 2007. Vol. 93, № 3. P. 190–206. DOI: 10.1097/HP.0000266071.43137.0e.
6. Efimov A. Mayak Worker Dosimetry System: History and Perspectives. URL: https://icrp.org/admin/2024-05_ViennaWor kshop-5.4_A-Efimov.pdf. (Дата обращения: 31.01.2025).
7. Fountos B.N., Rabovsky J.L. The Department of Energy's Russian Health Studies Program // Health Physics. 2007. Vol. 93, № 3. P. 187–189. DOI: 10.1097/01.HP.0000265218.12646.63.
8. Vasilenko E.K., Scherpelz R.I., Gorelov M.V. et al. External Dosimetry Reconstruction for Mayak Workers. AAHP Special Session Health Physics Society Annual Meeting. 2010. URL: http://www.hps1.org/aahp/public/AAHP_Special_Sessions/20 10_Salt_Lake_City/pm-1.pdf. (Дата обращения: 17.06.2013).
9. 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 plutonium activity in urine // Health Physics. 2013. Vol. 104, № 4. P. 366–378. DOI: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60.
10. Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, № 1–2.
11. Moseeva M.B., Azizova T.V., Grigoryeva E.S., Haylock R. Risks of circulatory diseases among Mayak PA workers with radiation doses estimated using the improved Mayak Worker Dosimetry System 2008 // Radiation Environmental Biophysics. 2014. Vol. 53, № 2. P. 469–477. DOI: 10.1007/s00411-014-0517-x.
12. Napier B.A. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2013): an introduction to the documentation // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, № 1–2. P. 6–9. DOI: 10.1093/rpd/ncx2020.
13. Хохряков В.Ф., Хохряков В.В., Суслова К.Г. и др. Достижения в области разработок дозиметрии плутония на ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 1. С. 36–57.
14. Suslova K.G., Sokolova A.B., Krahenbuhl M.P., Miller S.C. The effects of smoking and lung health on the organ retention of different plutonium compounds in the Mayak PA workers // Radiation Research. 2009. Vol. 171, № 3. P. 302–309. DOI: 10.1667/0033-7587-171.3.302.
15. Health Physics Society. An American National Standard. Performance criteria for radiobioassay. New York: American National Standards Institute; HPS N13.30-1996; 1996.
16. Leggett R.W., Eckerman K.F., Khokhryakov V.F. et al. Mayak worker study: an improved biokinetic model for reconstructing doses from internally deposited plutonium // Radiation Research. 2005. Vol. 164, № 4. P. 111–122. DOI: 10.1667/rr3371.
17. Birchall A., Vostrotin V., Puncher M. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013) for internally deposited plutonium: an overview // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, № 1–2. P. 10–31 DOI: 10.1093/rpd/ncx195.
18. Vostrotin V., Birchall A., Zhdanov A. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): internal dosimetry results // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, № 1–2. P. 190–201. DOI: 10.1093/rpd/ncw268.
19. Azizova T.V., Muirhead C.R., Druzhinina M.B. et al. Cardiovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948–1958 // Radiation Research. 2010. Vol. 174, № 2. P. 155–168. DOI: 10.1667/RR1789.1.
20. Azizova T.V., Muirhead C.R., Druzhinina M.B. et al. Cerebrovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948–1958 // Radiation Research. 2010. Vol. 174, № 6. P. 851–864. DOI: 10.1667/RR1928.1.
21. Azizova T.V., Muirhead C.R., Moseeva M.B. et al. Cerebrovascular diseases in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948–1972 // Radiation Environmental Biophysics. 2011. Vol. 50, № 4. P. 539–552. DOI: 10.1007/s00411-011-0377-6.
22. Azizova T.V., Muirhead C.R., Moseeva M.B. et al. Ischemic heart disease in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948–1972 // Health Physics. 2012. Vol. 103, № 1. P. 3–14. DOI: 10.1097/HP.0b013e3182243a62.
23. Simonetto C., Azizova T.V., Grigoryeva E.S. et al. Ischemic heart disease in workers at Mayak PA: latency of incidence risk after radiation exposure // PLoS One. 2014. Vol. 9, № 5. P. e96309. DOI: 10.1371/journal.pone.0096309.
24. Simonetto C., Schöllnberger H., Azizova T.V. et al. Cerebrovascular diseases in workers at Mayak PA: the difference in radiation risk between incidence and mortality // PLoS One. 2015. Vol. 10, No 5. P. e0125904. DOI: 10.1371/journal.pone.0125904.
25. Azizova T.V., Haylock R.G.E., Moseeva M.B. et al. Cerebrovascular diseases incidence and mortality in an extended Mayak worker cohort 1948–1982 // Radiation Research. 2014. Vol. 182, № 5. P. 529–544. DOI: 10.1667/RR13680.1.
26. Azizova T.V., Grigoryeva E.S., Haylock R.G.E. et al. Ischaemic heart disease incidence and mortality in an extended cohort of Mayak workers first employed in 1948–1982 // British Journal of Radiology. 2015. Vol. 88, № 1054. P. 20150169. DOI: 10.1259/bjr.20150169.
27. Azizova T.V., Bannikova M.V., Briks K.V. et al. Incidence risks for subtypes of heart diseases in a Russian cohort of Mayak Production Association nuclear workers // Radiation Environmental Biophysics. 2023. Vol. 62, № 1. P. 51–71. DOI: 10.1007/s00411-022-01005-0.
28. Azizova T.V., Moseeva M.B., Grigoryeva E.S., Hamada N. Incidence risks for cerebrovascular diseases and types of stroke in a cohort of Mayak PA workers // Radiation Environmental Biophysics. 2022. Vol. 61, № 1. P. 5–16. DOI: 10.1007/s00411-022-00966-6.
29. Azizova T.V., Bannikova M.V., Grigoryeva E.S., Briks K.V. Mortality from various diseases of the circulatory system in the Russian Mayak nuclear worker cohort: 1948–2018 // Journal of Radiological Protection. 2022. Vol. 42, № 2. DOI: 10.1088/1361-6498/ac4ae3.

Поступила: 25.05.2025

Мосеева Мария Борисовна – научный сотрудник, 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: clinic@subi.su

ORCID: 0000-0003-3741-6600

Азизова Тамара Васильевна – заведующая клиническим отделом, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID: 0000-0001-6954-2674

Для цитирования: Мосеева М.Б., Азизова Т.В. Сравнительный анализ радиогенного риска заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца и cerebrovasculärных заболеваний в когорте работников, подвергшихся хроническому облучению // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 3. С. 58-69. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-58-69

Comparative analysis of radiogenic risk of ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the cohort of workers chronically exposed to radiation

Maria B. Moseeva , Tamara V. Azizova

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

Circulatory diseases are the leading cause of death all around the world. Even a small increase in radiogenic risk would lead to a significant increase in incident cases and deaths as the number of individuals exposed to radiation for different purposes increases constantly. The aim of the study was a comparative analysis of radiogenic risk of incidence and mortality from ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the cohort of Mayak Production Association workers based on several dosimetry systems. The first analysis of studied incident cases and death causes was performed using dosimetry system "Doses-2005" which included data on occupational histories as well as external and internal radiation exposure doses for workers employed at one of the main facilities during 1948–1972. The subsequent dosimetry systems, "MWDS-2008" and "MWDS-2013", additionally included data for workers employed in the later years (1973–1982). The necessity to improve the external dose estimates was conditioned by a number of factors, i.e. using different types of dosimeters during all monitoring period, lack of accounting for individual radiation exposure specificities for separate workers etc.; whereas discrepancies between plutonium activities in some organs/tissues estimated by the systems and the ones measured in autopsy samples made for improvements in internal dosimetry system. Conclusion: The excess relative risk estimate for ischemic heart disease incidence and mortality was the most significantly affected by the improvements in dosimetry system for the internal exposure due to incorporated plutonium.

Key words: ischemic heart disease, cerebrovascular diseases, radiogenic risk, dosimetry system, Mayak workers cohort.

Authors' personal contribution

Thereby, all authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research, and preparation of the article, as well as read and approved the final version before its publication).

Maria B. Moseeva was responsible for analyzing and interpreting literature data, writing the main part of the text.

Tamara V. Azizova was responsible for developing the concept, providing general scientific management, making final edits.

Acknowledgments

The authors are grateful to Bannikova M.V., researcher of the Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, for consultations.

Conflict of interests

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

Sources of funding

The study was carried out within the framework of the state contract as of 6 June 2024 №11.313.24.2 with Federal medical biological agency titled "Assessment of chronic radiation exposure effects and study of their pathogenesis for improvement of medical provision for personal and population exposed to radiation".

References

1. Stuart FA, Akleev AV, Hauer-Dzhensen M. ICRP report on tissue reactions, early and late effects in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in the context of radiation protection. Chelyabinsk: Kniga; 2012. 384 p. (In Russian).

Maria B. Moseeva

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

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

2. Little MP, Azizova TV, Richardson DB, Tapio S, Bernier M, Kreuzer M, et al. Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis. *British Medical Journal*. 2023; 380. DOI: 10.1136/bmj-2022-072924.
3. Vasilenko EK. External radiation dosimetry for Mayak PA workers: equipment, methods, monitoring data. Ozersk: b.i.; 2009. P. 51-100. (In Russian).
4. Koshurnikova NA, Shilnikova NS, Okatenko PV, Kreslov VV, Bolotnikova MG, Sokolnikov ME et al. Characteristics of the cohort of workers at the Mayak nuclear complex. *Radiation Research*. 1999;152(4): 352-363.
5. Vasilenko EK, Khokhryakov VF, Miller SC, Fix JJ, Eckerman K, Choe DO, et al. Mayak worker dosimetry study: an overview. *Health Physics*. 2007;93(3): 190-206. DOI: 10.1097/01.HP.0000266071.43137.0e.
6. Efimov A. Mayak Worker Dosimetry System: History and Perspectives. Available from: https://icrp.org/admin/2024-05_ViennaWorkshop-5.4_A-Efimov.pdf [Accessed 31 January 2025].
7. Fountos BN, Rabovsky JL. The Department of Energy's Russian Health Studies Program. *Health Physics*. 2007;93(3): 187-189. DOI: 10.1097/01.HP.0000265218.12646.63.
8. Vasilenko EK, Scherpelz RI, Gorelov MV, Strom DJ, Smetanin MYu. External Dosimetry Reconstruction for Mayak Workers. AAHP Special Session Health Physics Society Annual Meeting. 2010. Available from: http://www.hps1.org/aahp/public/AAHP_Special_Sessions/2010_Salt_Lake_City/pm-1.pdf. [Accessed 17 June 2013].
9. Khokhryakov VV, Khokhryakov VF, Suslova KG, Vostrotin 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): 366-78. DOI: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60.
10. Radiation Protection Dosimetry. 2017; 176(1-2).
11. Moseeva MB, Azizova TV, Grigoryeva ES, Haylock R. Risks of circulatory diseases among Mayak PA workers with radiation doses estimated using the improved Mayak Worker Dosimetry System 2008. *Radiation Environmental Biophysics*. 2014;53(2): 469-77. DOI: 10.1007/s00411-014-0517-x.
12. Napier BA. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2013): an introduction to the documentation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1-2): 6-9. DOI: 10.1093/rpd/ncx020.
13. Khokhryakov VF, Khokhryakov VV, Suslova KG, Vostrotin VV, Tchadilov AE, Sokolova AB, et al. Achievements in plutonium dosimetry developments at Mayak PA. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Questions of radiation safety*. 2006;1: 36-57. (In Russian).
14. Suslova KG, Sokolova AB, Krahenbuhl MP, Miller SC. The effects of smoking and lung health on the organ retention of different plutonium compounds in the Mayak PA workers. *Radiation Research*. 2009;171(3): 302-309. DOI: 10.1667/0033-7587-171.3.302.
15. Health Physics Society. An American National Standard. Performance criteria for radiobioassay. New York: American National Standards Institute; HPS N13.30-1996; 1996.
16. 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(2): 111-22. DOI: 10.1667/rr3371.
17. Birchall A, Vostrotin V, Puncher M, Efimov A, Dorrian M-D, Sokolova A, et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013) for internally deposited plutonium: an overview. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1-2): 202. DOI: 10.1093/rpd/ncx195.
18. Vostrotin V, Birchall A, Zhdanov A, Puncher M, Efimov A, Napier B, et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): internal dosimetry results. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1-2): 190-201. DOI: 10.1093/rpd/ncw268.
19. Azizova TV, Muirhead CR, Druzhinina MB, Grigoryeva ES, Vlasenko EV, Sumina MV, et al. Cardiovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948-1958. *Radiation Research*. 2010;174(2): 155-68. DOI: 10.1667/RR1789.1.
20. Azizova TV, Muirhead CR, Druzhinina MB, Grigoryeva ES, Vlasenko EV, Sumina MV, et al. Cerebrovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948-1958. *Radiation Research*. 2010;174(6): 851-64. DOI: 10.1667/RR1928.1.
21. Azizova TV, Muirhead CR, Moseeva MB, Grigoryeva ES, Sumina MV, O'Hagan J, et al. Cerebrovascular diseases in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948-1972. *Radiation Environmental Biophysics*. 2011;50(4): 539-52. DOI: 10.1007/s00411-011-0377-6.
22. Azizova TV, Muirhead CR, Moseeva M., Grigoryeva ES, Vlasenko EV, Hunter N, et al. Ischemic heart disease in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948-1972. *Health Physics*. 2012;103(1): 3-14. DOI: 10.1097/HP.0b013e3182243a62.
23. Simonetto C, Azizova TV, Grigoryeva ES, Kaiser JC, Schöllnberger H, Eidemüller M. Ischemic heart disease in workers at Mayak PA: latency of incidence risk after radiation exposure. *PLoS One*. 2014;9(5): e96309. DOI: 10.1371/journal.pone.0096309.
24. Simonetto C, Schöllnberger H, Azizova TV, Grigoryeva ES, Pikulina MV, Eidemüller M. Cerebrovascular diseases in workers at Mayak PA: the difference in radiation risk between incidence and mortality. *PLoS One*. 2015;10(5): e0125904. DOI: 10.1371/journal.pone.0125904.
25. Azizova TV, Haylock RGE, Moseeva MB, Bannikova MV, Grigoryeva ES. Cerebrovascular diseases incidence and mortality in an extended Mayak worker cohort 1948-1982. *Radiation Research*. 2014;182(5): 529-544. DOI: 10.1667/RR13680.1.
26. Azizova TV, Grigoryeva ES, Haylock RGE, Pikulina MV, Moseeva MB. Ischaemic heart disease incidence and mortality in an extended cohort of Mayak workers first employed in 1948-1982. *British Journal of Radiology*. 2015;88(1054): 20150169. DOI: 10.1259/bjr.20150169.
27. Azizova TV, Bannikova MV, Briks KV, Grigoryeva ES, Hamada N. Incidence risks for subtypes of heart diseases in a Russian cohort of Mayak Production Association nuclear workers. *Radiation Environmental Biophysics*. 2023;62(1): 51-71. DOI: 10.1007/s00411-022-01005-0.
28. Azizova TV, Moseeva MB, Grigoryeva ES, Hamada N. Incidence risks for cerebrovascular diseases and types of stroke in a cohort of Mayak PA workers. *Radiation Environmental Biophysics*. 2022;61(1): 5-16. DOI: 10.1007/s00411-022-00966-6.
29. Azizova TV, Bannikova MV, Grigoryeva ES, Briks KV. Mortality from various diseases of the circulatory system in the Russian Mayak nuclear worker cohort: 1948-2018. *Journal of Radiological Protection*. 2022;42(2). DOI: 10.1088/1361-6498/ac4ae3.

Received: May 25, 2025

For correspondence: Maria B. Moseeva – Researcher, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency (19 Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: clinic@subi.su)

ORCID: 0000-0003-3741-6600

Tamara V. Azizova – Head of the Research Department of Radiation Epidemiology, Senior Researcher, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0001-6954-2674

For citation: Moseeva M.B., Azizova T.V. Comparative analysis of radiogenic risk of ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the cohort of workers chronically exposed to radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 3. P. 58-69. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-58-69

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-70-82

УДК: 614.876:621.039.58

Номенклатура медицинских средств противорадиационной защиты, применяемых при крупномасштабных радиационных авариях

Горский Г.А.^{1,2}, Библин А.М.¹, Водоватов А.В.^{1,3}, Вишнякова Н.М.^{1,2}

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

² Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Широкое использование ядерных и радиационных технологий обуславливает необходимость готовности к реагированию на радиационные аварии. Применение средств, смягчающих негативное воздействие ионизирующего излучения, является одним из важных элементов стратегии управления и минимизации таких рисков, в первую очередь, на ранних фазах крупномасштабных радиационных аварий у лиц, непосредственно осуществляющих аварийное реагирование. Для проведения профилактических и лечебных мероприятий при воздействии на организм ионизирующего излучения (при внешнем, внутреннем или сочетанном облучении) применяются медицинские средства противорадиационной защиты. Цель работы – обоснование выбора и способа применения современных медицинских средств противорадиационной защиты для различных сценариев радиационных аварий. Материалы и методы: Выполнен обзор отечественных и зарубежных научных публикаций, нормативно-методических документов и рекомендаций за 2010–2025 гг. Результаты исследования и обсуждение: Определены основные сценарии, при которых необходимо применение медицинских средств противорадиационной защиты. Определены основные группы препаратов, их механизм действия и назначение в системе медицинской радиационной защиты. Проведено сравнение отечественной и зарубежной номенклатуры средств противорадиационной защиты. Заключение: Установлено, что отечественная номенклатура препаратов является более универсальной и позволяет покрывать более широкий диапазон аварийных ситуаций с источниками ионизирующего излучения по сравнению с зарубежной. Применение специфических препаратов должно определяться в каждом конкретном случае исходя из сценария радиационной аварии, радиационной обстановки, радионуклидного состава выбросов. Вопросам расширения номенклатуры средств противорадиационной защиты и создания их запасов следует уделять особое внимание в рамках мероприятий по обеспечению аварийной готовности.

Ключевые слова: радиационная авария, радиопротекторы, радиомитигаторы, аварийное реагирование, йодид калия, йодная профилактика.

Введение

Широкое применение ядерных и радиационных технологий в различных отраслях экономики, включая электроэнергетику, медицину и промышленное производство, обуславливает необходимость обеспечения готовности к радиационным авариям. Аварии, связанные с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду, могут представлять значительный риск для здоровья людей и формировать обширные зоны радиоактивного загрязнения территорий. Применение средств, смягчающих негативное воздействие ионизирующего излучения, является одним из важных элементов стратегии управления и минимизации таких рисков, в первую очередь, на ранних фазах крупномасштабных радиационных аварий у лиц, непосредственно осуществляющих аварийное реагирование. Для проведения профилактических и лечебных мероприятий при воздействии на организм ионизирующего излучения

(в условиях внешнего, внутреннего или сочетанного облучения) применяются медицинские средства противорадиационной защиты (СПРЗ), которые включают в себя несколько групп средств: профилактические, лечебно-профилактические и лечебные лекарственные препараты [1]. Ситуации, при которых может потребоваться применения СПРЗ, могут возникнуть в результате множества сценариев: аварий на атомных электростанциях, актов ядерного и радиационного терроризма, ненадлежащего обращения с источниками ионизирующего излучения, проведения процедур лучевой терапии и пр.

К СПРЗ относятся лекарственные препараты и биологически активные добавки, предназначенные для защиты здоровых тканей от повреждающего действия ионизирующего излучения. Механизмы их действия разнообразны: устранение свободных радикалов, усиление процессов репарации ДНК, стимуляцию иммунного ответа, связывание и элиминацию метаболитов, высвобождающихся после облучения,

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

или связывание инкорпорированных радионуклидов. К сожалению, далеко не все медицинские СПРЗ обладают необходимой специфичностью, а их эффективность определяется своевременностью их применения (до, после или во время облучения).

В случае возникновения радиационной аварии специалисты органов и организаций Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) и медико-санитарных подразделений Федерального медико-биологического агентства (ФМБА России) будут задействованы в мероприятиях по обеспечению радиационной безопасности персонала аварийных объектов и организации медико-санитарной помощи населению на пострадавших территориях [2]. Специалисты в области радиационной гигиены привлекаются органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации при выработке и принятии решений о применении СПРЗ (например, йодида калия) на пострадавших территориях, а также организовывают разъяснительную работу с населением, направленную на профилактику самоназначения таких средств или их суррогатов. После проведения радиационного контроля, определения зон радиоактивного загрязнения и уточнения основных путей облучения населения специалисты Роспотребнадзора будут принимать решение о применении населению радиомитигаторов, исходя из сложившейся на территории радиационной обстановки.

Для успешного решения задач по обеспечению радиационной защиты персонала и населения в случае возникновения радиационной аварии специалистам в области радиационной гигиены и радиационной защиты необходимо иметь представление о номенклатуре медицинских СПРЗ, показаниях и схемах их применения.

Цель исследования – обоснование выбора и способа применения современных медицинских средств противорадиационной защиты для различных сценариев радиационных аварий.

Материалы и методы

Был выполнен обзор отечественных и зарубежных публикаций в рецензируемых научных журналах, монографий, учебных пособий, отечественных и международных нормативно-методических документов, рекомендаций и фармакологических справочников по стандартам PRISMA (2009 год).

В обзор включались источники не старше 2010 года. Поиск проходил по ключевым словам: «радиопротекторы» (“radioprotectors”), «радиомитигаторы» (“radiomitigators”), «медицинские средства противорадиационной защиты» (“medical agents for radiation protection”), «терапия лучевых поражений» (“therapy of radiation injuries”), «профилактика радиационных поражений» (“prevention and mitigation of radiation injuries”). Поиск проводился с использованием систем индексирования: eLIBRARY.RU, PubMed, Google Scholar. Результаты поиска проходили валидацию на предмет содержимого публикаций целям исследования. После осуществления поискового запроса в базах данных по ключевым словам, были исключены дублирующие результаты. Затем было рассмотрено текстовое содержание отобранных статей, включая такие параметры как год публикации, дизайн исследований, цель, методология и результаты, после чего произведено второе исключение. Общая выборка составила 1657 публикаций. Из числа найденных публикаций были исключены публикации, посвященные зарегистрированным и использующимся на практике препаратам, и публикации, в которых описаны ситуации острого облучения. В итоговые результаты систематического обзора было включено 22 публикации [1, 3–23].

Результаты и обсуждение

В 2023 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) опубликовала рекомендации по применению СПРЗ при различных сценариях радиационных аварий [3]. Рассматриваемые сценарии связаны с острым внешним и/или внутренним облучением отдельных групп населения. Для удобства восприятия основные положения данного документа представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные сценарии, при которых необходимо применение медицинских средств противорадиационной защиты [3]

[Table 1]

Main scenarios requiring the use of medical countermeasures for radiation protection [3]]

Сценарий [Scenario]	Основные дозообразующие радионуклиды [Main dose-forming radionuclides]	Основные последствия для здоровья [Major health consequences]	Основные защитные средства [Primary protective measures]	Число потенциальных жертв (по данным моделирования) [Estimated number of potential casualties (based on modeling data)]
Авария на атомной электростанции [Accident at a nuclear power plant]	Основной вклад: йод, цезий Дополнительный вклад: плутоний, стронций, другие радионуклиды [Major contribution: iodine, cesium; additional contribution: plutonium, strontium, and other radionuclides]	Внешнее и внутреннее облучение, повышенный риск развития рака [External and internal radiation, increased risk of cancer]	Блокада щитовидной железы препаратами йодида калия [Thyroid blockade with KI]	Все население на загрязненных территориях [Entire population within contaminated areas]

Сценарий [Scenario]	Основные дозообразующие радионуклиды [Main dose-forming radionuclides]	Основные последствия для здоровья [Major health consequences]	Основные защитные средства [Primary protective measures]	Число потенциальных жертв (по данным моделирования) [Estimated number of potential casualties (based on modeling data)]
Ядерный взрыв (менее 10 кТ) [Nuclear explosion (less than 10 kT)]	Различные короткоживущие радионуклиды: йод, цезий, церий, плутоний [Various short-lived radionuclides: iodine, cesium, cerium, plutonium]	Массовые жертвы: смертельные случаи, тепловые ожоги, травмы, сочетанные поражения, остшая лучевая болезнь, кожные поражения, повышенный риск развития рака [Mass casualties: fatalities, thermal burns, mechanical injuries, combined lesions, acute radiation syndrome, skin lesions, and increased cancer risk]	Колонии-стимулирующие факторы – для пациентов с острой лучевой болезнью, йодид калия – для членов аварийных бригад [Colony-stimulating factors – for patients with acute radiation syndrome; KI – for members of emergency response teams]	Около 200 тысяч человек для города с населением в 2 миллиона человек [About 200 000 people in a city with a population of 2 million]
Применение «грязной бомбы» [Use of a "dirty bomb"]	Цезий, америций, кобальт, йод, иридий, полоний, плутоний и другие [Cesium, americium, cobalt, iodine, iridium, polonium, plutonium, and others]	Внешнее загрязнение радиоактивными частицами; попадание радиоактивных частиц в раны; внутреннее облучение [External contamination with radioactive particles; contamination of wounds with radioactive material; internal contamination]	Для внутреннего загрязнения: цезий – ферроцин; америций, плутоний – хелаты на основе DTPA; стронций – альгинаты [For internal contamination: cesium – ferrocin; americium, plutonium – DTPA-based chelates; strontium – alginates]	Около 60 тысяч человек для различных модельных сценариев [Approximately 60 000 people depending on modeled scenarios]
Отравление радионуклидами [Internal contamination with radionuclides]		Внутреннее загрязнение радионуклидами (орган-мишень зависит от конкретного радионуклида) [Internal contamination (organ-specific radiation injury)]		Количество пострадавших зависит от сценариев [Number of affected individuals depends on the scenario]
Радиационная авария с техногенными источниками ионизирующего излучения [Radiation accident involving industrial sources of ionizing radiation]	Все гамма-излучающие радионуклиды [All gamma-emitting radionuclides]	Внешнее облучение в высоких дозах, остшая лучевая болезнь [High-dose external exposure, acute radiation syndrome]	Цитокины и факторы роста для пациентов с острой лучевой болезнью [Cytokines and growth factors for patients with acute radiation syndrome]	Отдельные люди [Individual cases]

Как следует из данных, представленных в таблице 1, основными ситуациями, которые потребуют применения СПРЗ являются аварии на объектах использования атомной энергии (например, АЭС) или применение ядерного оружия. В таких случаях обеспечение СПРЗ потребуется одновременно значительному контингенту населения на территории нескольких субъектов Российской Федерации. Применение СПРЗ может быть необходимо также при радиационных авариях, произошедших за пределами Российской Федерации. При таких ситуациях нет гарантии в возможности оперативного получения достоверной информации о развитии радиационной аварии, а также в большинстве случаев

не будет возможности влиять на источник радиоактивного загрязнения. Данное обстоятельство требует подготовки отечественных запасов СПРЗ и четких инструкций по их применению, доведенных до исполнителей.

Реагирование на радиационные аварии с техногенными источниками ионизирующего излучения ассоциировано с меньшим количеством проблем, так как количество пострадавших ограничено, а радиационные поражения носят локальный характер.

Номенклатура основных видов СПРЗ представлена в работе А.Н. Гребенюка и В.Д. Гладких [4] (табл. 2).

Номенклатура медицинских средств противорадиационной защиты [4]

Table 2

Nomenclature of medical agents for radiation protection [4]

Группа/подгруппа противоволневых средств [Group / Subgroup of radioprotective agents]	Лекарственные препараты и субстанции [Pharmaceuticals and substances]
Средства профилактики [Preventive agents]	<p>Радиопротекторы [Radioprotectors]</p> <p>Препарат Б-190 (индралин), цистамин, мексамиин, амифостин (этиол, WR-2721, гаммафос), нафазолин, Т1023 и др. [B-190 (Indralin), Cystamine, Mexamine, Amifostine (Ethiol, WR-2721, Gammaphos), Naphazoline, T1023, and others]</p>
Лечебно-профилактические средства [Therapeutic and preventive agents]	<p>Средства стимуляции радиорезистентности организма [Agents stimulating radioresistance of the organism]</p> <p>Индометафен, гепарин, рибоксин, гуанозин, глутоксим, моликсан, МИГИ-К, аминокислотно-витаминные комплексы, адаптогены и др. [Indomethafen, Heparin, Riboxin, Guanosine, Glutoxim, Molixan, MIGI-K, amino acid-vitamin complexes, adaptogens, and others]</p> <p>Радиомитигаторы [Radiomitigators]</p> <p>Беталейкин, тромбоцитоэтин, вакцины, полисахарида, 5-андростендиол (5-АЕД), флагеллин, генистейн, мелатонин, фенозан калия, диэкол, сезамол, витамин Е и его производные (токоферолы), дезоксинанат (деринат), нуклеоспермат натрия, транслам, ксантоzin, кофеин, тималин, тимоген, селенметионин и др. [Betaleukin, Thrombopoietin, vaccines, polysaccharides, 5-androstenediol (5-AED), Flagellin, Genistein, Melatonin, Potassium phenozan, Diekol, Sesamol, vitamin E and its derivatives (tocopherols), Deoxinate (Derinat), sodium nucleosperm, Translam, Xanthosine, caffeine, Thymalin, Thymogen, selen methionine, and others]</p>
Средства терапии [Therapeutic agents]	<p>Средства профилактики и купирования первичной реакции на облучение [Agents for prevention and relief of the primary radiation reaction]</p> <p>Латран (ондансетрона гидрохлорид дигидрат), трописетрон, гранисетрон, палонсетрон, этаперазин, диметправид, метоклопрамид, домперидон и др. [Latran (ondansetron hydrochloride dihydrate), Tropisetron, Granisetron, Palonsetron, Etaperazine, Dimetpravid, Metoclopramide, Domperidone, and others]</p> <p>Средства профилактики поражений от облучения инкорпорированными радионуклидами [Agents for prevention of injuries caused by incorporated radionuclides]</p> <p>Калий йодид, калия перхлорат, ферроцин (калий-железо гексационноферрат), пентацин (кальция тринатрия пентенат), цинкацин, унитиол и др. [Potassium iodide, potassium perchlorate, Ferrocin (potassium ferric hexacyanoferrate), Pentacin (calcium trisodium pentetate), Zincacinc, Unithiol, and others]</p>
	<p>Средства лечения острого костномозгового синдрома острой лучевой болезни [Agents for treatment of acute bone marrow syndrome of acute radiation sickness]</p> <p>Препараты Г-КСФ и ГМ-КСФ, антибиотики широкого спектра действия, противовирусные и противогрибковые препараты, дезинтоксикационные средства, амбен, тромбоцитарная масса, серотонина адипинат, эритромасса и др. [G-CSF and GM-CSF preparations, broad-spectrum antibiotics, antiviral and antifungal drugs, detoxification agents, Amben, platelet mass, serotonin adipinate, erythrocyte mass, and others]</p> <p>Средства лечения местных лучевых поражений [Agents for treatment of local radiation injuries]</p> <p>Антисептики, антибиотики, антиоксиданты, коллагеновые покрытия, ликсизан-гель, левомеколь и др. [Antiseptics, antibiotics, antioxidants, collagen coatings, Lioxizan-gel, Levomekol, and others]</p>

Как следует из таблицы 2, к СПРЗ принято относить значительное количество групп лекарственных препаратов и биологически активных добавок. Непосредственно к радиопротекторам (т.е. препаратам, повышающим устойчивость организма к действию ионизирующего излучения) относится ограниченное количество соединений. Противорадиационное действие радиопротекторов преимущественно проявляется в снижении пострадиационной смертности облученных организмов, поэтому при сублетальных дозах облучения они не эффективны. Малоэффективны радиопротекторы и при дозах облучения, вызывающих кишечную,

токсемическую и церебральную формы острой лучевой болезни. Основной эффект проявляется в виде снижения последствий костномозгового синдрома (доза облучения всего тела около 1 Гр).

Остальные группы соединений обеспечивают неспецифическую противорадиационную защиту: связывание и выведение из организма инкорпорированных радионуклидов, восстановление кроветворной функции и стимуляция гемопоэза, связывание свободных радикалов, антиоксидантное действие, повышение иммунного статуса. Для решения этих задач, помимо препаратов, представленных в таблице 2,

может использоваться весь спектр зарегистрированных в Российской Федерации лекарственных препаратов и биологически активных добавок со сходными механизмами действия. Применение таких препаратов (за исключением комплексообразователей) должно проводиться по назначению медицинских специалистов, исходя из клинической картины и состояния пострадавших.

Для решения задач радиационной защиты населения могут использоваться различные препараты и соединения

с неспецифическим радиопротекторным механизмом действия. К таким соединениям, как правило, относятся антиоксиданты и стимуляторы неспецифического иммунитета (табл. 3). В качестве примера одного из эффективных средств целесообразно выделить производные 1,4-дигидропиридинов, например: мазь «Диэтон», разработанную Ленинградским научно-исследовательским институтом радиационной гигиены и Институтом органического синтеза АН ЛатвССР [23, 24].

Общая характеристика эффективности радиозащитных препаратов [23]

Таблица 3

General characteristics of the effectiveness of radioprotective agents [23]

Table 3

Испытанные вещества (комплексы, композиции) [Tested substances (complexes, compositions)]			Биологическая эффективность при радиационных поражениях [Biological effectiveness in radiation injuries]
Источник получения и химическая природа [Source and chemical nature]	Торговое или рабочее название [Trade or experi- mental name]	Мембранный-протекторное, противорадикальное, антиоксидантное действие; блокаторы медленных кальциевых каналов, антиопротекторные свойства [Membrane-protective, antiradical, and antioxidant activity; slow calcium channel blockers; antiatheroprotective properties]	Общее и местное радиозащитное профилактическое и лечебное (корректирующее) действия в отношении кожи, слизистых оболочек, печени и щитовидной железы. Повышение средней продолжительности жизни. Антиканцерогенное и геропротекторное действия. [General and local radioprotective, preventive, and therapeutic (corrective) effects on skin, mucous membranes, liver, and thyroid gland. Increased life expectancy. Anticarcinogenic and geroprotective properties]
1,4-дигидропиридины (аналоги никотинамида и никотиновой кислоты). Получены путем химического синтеза, способы которого запатентованы [1,4-Dihydropyridines (analogs of nicotinamide and nicotinic acid). Obtained by chemical synthesis; synthesis methods are patented]	Диэтон, глутапи- рон, карбатон, ти- ратрон [Dieton, Glutapy- rone, Karbaton, Tiatron]	Антиоксидантное, антиканцерогенное, иммуностимулирующее действие [Antioxidant, anticarcinogenic, immunostimulating activity]	Онкопротекторный эффект. Гемостимулирующее действие (альгиклам) [Oncoprotective effect. Hematopoietic stimulation (Algiklam)]
Ламинария [Laminaria]	Концентрат ламинарии, кламин, альгиклам [Laminaria Concentrate, Klamin, Algiklam]	Антиоксидантное, антиканцерогенное, иммуностимулирующее действие [Antioxidant, anticarcinogenic, immunostimulating activity]	Онкопротекторное и гемостимулирующее действие [Oncoprotective effect. Hematopoietic stimulation]
Зелень хвойных пород [Coniferous plant greens]	Феокарпин, лесмин, хвойный концентрат, хлорофиллин [Feocarpin, Lesmin, Conifer Concentrate, Chlorophyllin]	Ранозаживляющее действие. Стимуляция кроветворения [Wound-healing effect. Stimulation of hematopoiesis]	Повышение продолжительности жизни. Улучшение иммунологических и гематологических показателей [Increased life expectancy. Improved immunological and hematological parameters]
Яйца переполов [Quail eggs]	Источник аминокислот и других питательных веществ [Source of amino acids and other nutrients]		

Испытанные вещества (комплексы, композиции) [Tested substances (complexes, compositions)]			
Источник получения и химическая природа [Source and chemical nature]	Торговое или рабочее название [Trade or experimental name]	Мембрально-протекторное, противорадикальное, антиоксидантное действия; блокаторы медленных кальциевых каналов, антипротекторные свойства [Membrane-protective, antiradical, and antioxidant activity; slow calcium channel blockers; antiatheroprotective properties]	Биологическая эффективность при радиационных поражениях [Biological effectiveness in radiation injuries]
Комбинированное применение различных производных 1,4-ДГП [Combined use of various 1,4-DHP derivatives]		Индатон — глутапирон [Indaton—Glutapyrone]	Синергичное действие [Synergistic effect]
Производные 1,4-ДГП совместно с другими радиопротекторами [1,4-DHP derivatives used together with other radioprotectors]		Диэтон + адетурон [Dieton + Adeturone]	Повышение местного защитного эффекта [Enhanced local protective effect]
Производные 1,4-ДГП совместно с природными средствами [1,4-DHP derivatives combined with natural products]		Феокарпин + глутапирон [Feocarpin + Glutapyrone]	Усиление гематопротекторного действия [Enhanced hematoprotective effect]

Тем не менее, для решения практических задач противоизлучательной защиты населения используется стандартизованный набор препаратов.

Основные медицинские СПРЗ, предназначенные для профилактики и оказания помощи пострадавшим при воздействии ионизирующего излучения, в Российской Федерации представлены в таблице 4.

Таблица 4

Наименование, лекарственные формы, предназначение и схемы применения средств медицинской противорадиационной защиты

[Table 4]

Names, dosage forms, purposes, and administration regimens of medical countermeasures for radiation protection

Наименование [Name]	Лекарственная форма [Dosage form]	Предназначение [Purpose]	Схема применения [Administration regimen]
Б-190 [B-190]	Таблетки по 150 мг [Tablets, 150 mg]	Радиопротектор [Radioprotector]	Внутрь в дозе 450 мг за 15-20 минут до предполагаемого облучения. допускается повторный прием с интервалом 1 час [Orally, 450 mg 15–20 minutes before the expected exposure; repeated administration is allowed at 1-hour intervals.]
Калий йодид [Potassium iodide]	Таблетки по 125 и 40 мг [Tablets, 125 mg and 40 mg]	Средство профилактики накопления радиоактивных изотопов йода в щитовидной железе [Preventive agent for reducing accumulation of radioactive iodine isotopes in the thyroid gland]	Порядок применения КI приведен в таблице 5 [The procedure for KI administration is given in Table 5]
Ферроцин (калий-железо гексационально-феррат) [Ferrocin (potassium ferric hexacyanoferrate)]	Таблетки по 0,5 г [Tablets, 0.5 g]	Средство для связывания и ускорения выведения из организма изотопов цезия [Agent for binding and accelerating the elimination of cesium isotopes from the body]	Внутрь в дозе 1 г 3 раза в день в течение 14-21 сут [Orally, 1 g three times daily for 14–21 days]

Наименование [Name]	Лекарственная форма [Dosage form]	Предназначение [Purpose]	Схема применения [Administration regimen]
Пентацин (кальция тринатрия пентенат) [Pentacin (calcium trisodium pentetate)]	Раствор для внутривен- ного введения и ингаля- ций 50 мг/мл в ампулах по 5 мл [Solution for intravenous in- jection and inhalation, 50 mg/mL in 5 mL am- poules]	Средство для связывания и ускорения выве- дения изотопов урана и трансурани- ческих элементов, плутония, америиции, кюрия [Agent for binding and accelerating the elimination of uranium and transuranic elements (plutonium, americium, curium)]	В случае ингаляционного пути поступления радионукли- дов: однократная ингаляция водного раствора 50 мг/мл в течение первых 24 ч после поступления. При других путях поступления: внутривенно медленно (в течение 3-4 минут) или капельно в 100-250 мл 5 % рас- твора дексстозы (глюкозы) или физиологического рас- твора в начальной дозе 1 г (20 мл 5% раствора). Далее, при необходимости, ежедневно по 1 г/сут с назначением поддержки препаратами цинка [If radionuclides are inhaled: single inhalation of 50 mg/mL aqueous solution within 24 h after intake. For other routes of intake: intravenously slowly (over 3–4 min) or by drip infusion in 100–250 mL of 5% dextrose (glucose) or saline solution at an initial dose of 1 g (20 mL of 5% solution); thereafter, if necessary, 1 g per day with zinc supplementation]
Унитиол, димеркарп- рол (Димеркарто- ропансульфат натрия моногидрат) [Unithiol, dimercaprol (sodium dimercaptopropane- 1-sulfonate monohydrate)]	Раствор для внутримы- шечного и подкожного выведения 50 мг/мл в ам- пулах по 5 мл. [Solution for intramuscular or subcutaneous injection, 50 mg/mL in 5 mL am- poules]	Средство для свя- зывания и уско- рения выведе- ния изо- топов полония [Agent for binding and accelerating the elimination of po- lonium isotopes]	Внутримышечно 250-500 мг (5-10 мл водного рас- твора 50 мг/мл), из расчета 0,05 г на 10 кг массы тела, в первые сутки – 3-4 раза, во вторые – 2-3 раза, в последующие – 1-2 раза [Intramuscularly 250–500 mg (5–10 mL of 50 mg/mL aqueous solution), calculated as 0.05 g per 10 kg body weight: 3–4 times on the first day, 2–3 times on the second, and 1–2 times on subsequent days]
Ондансетрон (латран, зофран) [Ondansetron (Latran, Zofran)]	Таблетки, покрытые об- ложкой, по 4 мг; раствор для внутривенного и внут- римышечного введения 2 мг/мл в ампулах по 2 и 4 мл [Film-coated tablets 4 mg; solution for intravenous and intramuscular injection 2 mg/mL in 2 and 4 mL am- poules]	Средство профи- лактики и купирова- ния первичной реак- ции на облучение [Agent for prevention and management of the primary radia- tion-induced reaction (nausea and vomit- ing)]	Для профилактики тошноты и рвоты – внутрь в дозе 8 мг за 30-60 мин до возможного облучения. Для купирования и лечения тошноты и рвоты – внутри- мышечно в дозе 4-8 мг или внутривенно медленно в дозе 4-8 мг, затем повторно в той же дозе с интерва- лом 2-4 ч [For prevention of nausea and vomiting: orally 8 mg 30–60 minutes before potential exposure. For treatment of nausea and vomiting: intramuscularly or intravenously (slow injection) at a dose of 4–8 mg, repeated every 2–4 hours as needed]

Одной из ключевых задач при обеспечении радиационной безопасности населения при возникновении крупномасштабной радиационной аварии является защита щитовидной железы от воздействия радиоактивных изотопов йода. Негативный опыт йодной профилактики во время аварии на Чернобыльской АЭС, когда она проводилась несвоевременно и не в должном объеме [25], обуславливает особое внимание к порядку её проведения. В 2017 году ВОЗ был опубликован документ «Блокирование щитовидной железы от поступления радиоактивного йода. Руководство для использования в противоаварийном планировании и аварийном реагировании на радиологические и ядерные чрезвычайные ситуации» [26]. В Советском Союзе первая инструкция по проведению йодной профилактике была разработана в Ленинградском институте радиационной гигиены в 1967 году [27]. Действующие рекомендации были утверждены ФМБА России в 2023 году¹. Критерием для начала

йодной профилактики в соответствии с НРБ 99/2009 является предотвращаемая поглощенная доза за первые 10 суток 250 мГр в щитовидной железе у взрослых и 100 мГр у детей. При таких предотвращаемых дозах решение о проведении йодной профилактики принимается по принципам обоснования и оптимизации с учетом конкретной обстановки и местных условий. При предотвращаемых поглощенных дозах на щитовидную железу за 10 суток, превышающих 2,5 Гр для взрослых и 1 Гр у детей, проведение йодной профилактики является безусловно необходимым.

В таблице 5 отображен порядок применения препаратов йодида калия для разных возрастных категорий населения с целью блокирования щитовидной железы.

Эффективность проведения йодной профилактики зависит от времени приема препарата стабильного йода (табл. 6).

¹Методические рекомендации ФМБА России № 91500.12.0002-2023 «Проведение йодной профилактики населению в случае возникновения радиационной аварии» [Methodological Guidelines MR FMBA of Russia No. 91500.12.0002-2023 "Administration of Iodine Prophylaxis to the Population in the Event of a Radiation Accident"(In Russ.)]

Защитный эффект проведения йодной профилактики в зависимости от времени приема препаратов КІ

Таблица 5

[Table 5]

Protective efficacy of stable iodine prophylaxis relative to the timing of administration]

Категория населения [Population category]	Порядок применения КІ [Dosage regimen for potassium iodide]
Взрослые [Adults]	По 1 таблетке (125 мг) один раз в сутки в течение всего срока выброса радиоактивных веществ, но не более 10 суток [1 tablet (125 mg) once per day for the entire duration of radioactive substance release, but not to exceed 10 days]
Дети от 3 до 14 лет [Children (3 to 14 years)]	По ½ таблетки (64 мг) 1 раз в сутки в течение 2 суток [½ tablet (64 mg) once per day for 2 days]
Дети до 3 лет [Children under 3 years]	По ¼ таблетки (32 мг) 1 раз в сутки в течение 5 дней [¼ tablet (32 mg) once per day for 5 days]
Новорожденные дети и находящиеся на грудном вскармливании [Newborns and breastfed infants]	По ¼ таблетки (16 мг) однократно [¼ tablet (16 mg) as a single dose]
Беременные женщины и кормящие матери [Pregnant and lactating women]	По 1 таблетке (125 мг) один раз в сутки в течение 2 суток [1 tablet (125 mg) once per day for 2 days]

Защитный эффект проведения йодной профилактики в зависимости от времени приема препаратов КІ¹

Таблица 6

[Table 6]

Protective efficacy of KI prophylaxis as a function of administration time relative to inhalation of radioactive iodine

Временной интервал между приемом КІ и ингаляцией радиоактивного йода, ч [Time interval between KI ingestion and radioactive iodine inhalation, hours]	Степень защиты щитовидной железы, % [Level of Thyroid Protection, %]
-24	70
-8	95
0	97
+2	70-80
+8	40
+24	2

Для минимизации воздействия радиоактивных изотопов йода на щитовидную железу ключевое значение имеет свое временное употребление препаратов стабильного йода населением на пострадавших территориях. В случае отсутствия таблеток йодида калия, в качестве вынужденной меры могут применяться другие препараты, содержащие йод:

спиртовая настойка йода и раствор Люголя (табл. 7). В связи с более высокой токсичностью атомарного йода, входящего в состав настойки йода и раствора Люголя, по сравнению с таблетированной формой йодида калия, применение этих препаратов возможно в исключительном случае.

Дозировки альтернативных препаратов, содержащих йод, для перорального приёма

Таблица 7

[Table 7]

Dosages of alternative iodine-containing preparations for oral administration

Форма препарата [Dosage form]	Возрастная группа [Age group]		
	Взрослые, включая беременных и кормящих женщин, и подростки (старше 12 лет) [Adults (including pregnant and lactating women) and adolescents (>12 years)]	Дети 0-12 лет [Children (0-12 years)]	Лица старше 45 лет [>45 years]
5% спиртовая настойка йода [5% Iodine tincture]	1 мл или ~ 44 капли в 1/2 стакана молока или воды [1 mL (approx. 44 drops) in 1/2 glass of milk or water]	Не рекомендуется [Not recommended]	Не рекомендуется [Not recommended]
Раствор Люголя [Lugol's solution]	1 мл или ~ 22 капли в 1/2 стакана молока или воды [1 mL (approx. 22 drops) in 1/2 glass of milk or water]	Не рекомендуется [Not recommended]	Не рекомендуется [Not recommended]

В соответствии с утвержденными методическими рекомендациями МЧС России², номенклатура запасов в зонах возможного радиоактивного загрязнения включает в себя радиопротекторы. Комплектация медицинских средств защиты проводится с учетом приказа Министерства здравоохранения Российской Федерации № 1164н³. В соответствии с Приказом № 1164н, в состав Комплекта индивидуального медицинского гражданской защиты для оказания первичной медико-санитарной помощи и первой помощи, которым обеспечивается личный состав формирований, выполняющий задачи в районах возможного радиоактивного загрязнения (заражения), комплектуется следующими лекарственными препаратами и медицинскими изделиями для оказания первичной медико-санитарной помощи:

1. Противоротные препараты (антагонисты серотонина, средство борьбы с проявлениями первичной реакции на внешнее радиационное воздействие – симптоматическое противоротное средство): ондансетрон (латран): таблетки, покрытые пленочной оболочкой 4 мг – 2 таблетки.

2. Обезболивающие средства (нестероидные противовоспалительные средства с выраженным анальгезирующим действием) – кеторолак: таблетки 10 мг – 1 таблетка или раствор для внутривенного и внутримышечного введения 30 мг/мл, 1 мл в ампуле – 1 ампула.

3. Антидоты (средства профилактики накопления в организме радиоизотопов цезия и других продуктов деления, ускорения их выведения из желудочно-кишечного тракта – комплексообразующие препараты) – Калий-железо гексацианоферрат (ферроцин): таблетки 500 мг – 1 таблетка.

4. Препараты йода для профилактики заболеваний щитовидной железы (средство профилактики накопления радиоактивных изотопов йода в щитовидной железе) – калия йодид: таблетки 125 мг – 1 таблетка.

5. Радиозащитные препараты (альфа-адреномиметик, средство экстренной медицинской защиты при внешнем радиационном воздействии) – индолилметиламиноэтанол (препарат Б-190): таблетки 150 мг – 3 таблетки.

Указанные препараты в различных сочетаниях или совместно определены нормативными и правовыми актами МЧС России, Минздрава России, Министерства обороны России, ФМБА России, Войск национальной гвардии Российской Федерации в качестве средств, обладающих защитным действием и применяемых в случае радиационных аварий или применения ядерного оружия для оказания первичной медико-санитарной помощи населению, ликвидаторам или военнослужащим.

Для сравнения, в зарубежных странах централизованно используются следующие медицинские СПРЗ (табл. 8) [3].

Таблица 8

[Table 8]

Медицинские средства противорадиационной защиты в зарубежных странах

Medical countermeasures for radiation protection in foreign countries]

Препарат [Pharmaceutical Agent]	Канада [Canada]	Германия [Germany]	Франция [France]	Англия [UK]	Япония [Japan]	США [USA]
KI	+	+	+	+	+	+
Ферроцин [Ferrocyn]	-	+	+	-	+	+
Кальциевые или цинковые соли диэтилентриамин-пентауксусной кислоты [Calcium / Zinc Trisodium Diethylenetriamine Pentaacetate]	-	+	+	0	+	+
Альгинаты [Alginates]	0	0	0	0	0	0
Антациды с алюминием [Aluminum-containing antacids]	0	0	0	0	0	0
Бикарбонат натрия [Sodium Bicarbonate]	0	0	0	0	0	0
Филграстим [Filgrastim]	0	0	0	0	0	+
Саграмостим / Молгромостим [Sargramostim / Molgramostim]	-	-	-	0	-	+
Ромиплостим [Romiplostim]	0	0	0	0	0	+

«+» применяется в качестве защитного средства при радиационных поражениях [Approved for use as a countermeasure against radiation injury].

«0» применяется для лечения других патологических состояний, не связанных с радиационными поражениями [Used for the treatment of other pathological conditions not related to radiation exposure].

«-» не применяется [Not used].

²Методические рекомендации по определению номенклатуры и объемов, создаваемых в целях гражданской обороны запасов материально-технических, продовольственных, медицинских и иных средств, накапливаемых федеральными органами исполнительной власти, организациями государственной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления и организациями. № 2-4-71-12-11. (утв. МЧС России 29.12.2021 № 2-4-71-12-11) [Methodological Guidelines No. 2-4-71-12-11 on Determining the Nomenclature and Volumes of Civil Defense Stockpiles of Material, Technical, Food, Medical and Other Resources, Accumulated by Federal Executive Authorities, State Authorities of the Subjects of the Russian Federation, Local Self-Government Bodies and Organizations. Approved by EMERCOM of Russia December 29, 2021. (In Russ.)]

³Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 28.10.2020 № 1164н (ред. от 22.02.2023) «Об утверждении требований к комплектации лекарственными препаратами и медицинскими изделиями комплекта индивидуального медицинского гражданской защиты для оказания первичной медико-санитарной помощи и первой помощи» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 1164n of October 28, 2020 (as amended on February 22, 2023) "On Approval of the Requirements for the Stocking of Medicinal Products and Medical Devices in an Individual Civil Defense Medical Kit for the Provision of Primary Health Care and First Aid" (In Russ.)]

Как следует из таблицы 8, номенклатура медицинских СПРЗ, обязательных к накапливанию и применению, несколько отличается от практики Российской Федерации. При этом применение йодида калия является обязательным и в Российской Федерации, и за рубежом. В Германии, Франции, Японии и США также обязательным препаратом является ферроцин. В номенклатуре зарубежных медицинских СПРЗ отсутствуют радиозащитные и противорвотные препараты. Напротив, номенклатура комплексообразователей в них является более широкой: дополнительно применяются альгинаты и различные антациды, направленные на предотвращение (снижение) инкорпорации радионуклидов, поступивших в организм перорально. Также применяется достаточно широкая номенклатура средств для лечения нейтропении, которые в качестве обязательных в номенклатуре отечественных медицинских средств противорадиационной защиты не входят.

В целом отечественная номенклатура препаратов является более универсальной и позволяет покрывать более широкий диапазон аварийных ситуаций с источниками ионизирующего излучения по сравнению с зарубежной номенклатурой.

Заключение

Как следует из представленных материалов, применение СПРЗ является важным компонентом обеспечения радиационной защиты персонала и населения при крупномасштабных радиационных авариях. Несмотря на то, что применение СПРЗ не способно полностью предотвратить избыточное облучение, их применение позволяет снизить дозы облучения в критических органах, снизить степень тяжести радиационных поражений и сократить период восстановления после радиационного поражения.

В настоящей работе рассмотрен широкий перечень медицинских препаратов радиационной защиты населения, которые возможно использовать при возникновении радиационных аварий. Показано, что ограниченный набор препаратов, входящий в обязательную номенклатуру средств СПРЗ, позволяет эффективно решать задачи радиационной защиты населения. Применение специфических препаратов должно определяться в каждом конкретном случае, исходя из сценария радиационной аварии, радиационной обстановки, радионуклидного состава выбросов. Как показано в статье, СПРЗ должны применяться своевременно, поэтому важную роль играет информирование специалистов о способах их применения и обеспечение органов местного самоуправления их необходимыми запасами. Вопросы обеспечения СПРЗ населения, проживающего за пределами зон наблюдения объектов атомной энергетики, а также населения, проживающего вне субъекта Российской Федерации, на территории которого размещены объекты 1 или 2 категории потенциальной радиационной опасности, будут выполнены авторами в следующей статье. Вопросам расширения номенклатура СПРЗ и создания их запасов следует уделять особое внимание в рамках мероприятий по обеспечению аварийной готовности. Требования НРБ-99/2009 в части критериев для принятия решений в начальном периоде радиационной аварии должны быть гармонизированы с международными рекомендациями.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Горский Г.А. – разработка дизайна исследования, написание текста статьи, формирование окончательного варианта статьи.

Библин А.М. – анализ данных, поиск публикаций по теме, написание текста статьи.

Водоватов А.В. – анализ данных, поиск публикаций по теме, написание текста статьи.

Вишнякова Н.М. – анализ данных, написание текста статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Совершенствование системы мероприятий и нормативно-методической базы по обеспечению аварийной готовности и реагирования органов и организаций Роспотребнадзора при возникновении радиационных аварий различных типов с целью оптимизации радиационной защиты населения Российской Федерации».

Литература

1. Гребенюк А.Н., Легеза В.И., Миляев А.В., Старков А.В. Современная стратегия защитных и медицинских мероприятий при радиационных авариях // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 4. С. 80-88. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-4-80-88.
2. Самойлов А.С., Романович И.К., Гречев М.И. К вопросу о координации действий сил и средств организаций и учреждений ФМБА России и Роспотребнадзора в чрезвычайных ситуациях радиационного характера // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 96-105. DOI 10.21514/1998-426X-2019-12-3-96-105.
3. Халимов Ю.Ш., Гребенюк А.Н., Карамуллин М.А. Современные возможности оказания терапевтической помощи при возникновении массовых санитарных потерь радиационного профиля // Военно-медицинский журнал. 2012. Т. 333, № 2. С. 24–32.
4. Гребенюк А.Н., Легеза В.И., Тарумов Р.А. Радиомитигаторы: перспективы использования в системе медицинской противорадиационной защиты // Военно-медицинский журнал. 2014. Т. 335, № 6. С. 39–43.
5. Islam M., Sultana N., Liu C. et al. Impact of dietary ingredients on radioprotection and radiosensitization: a comprehensive review // Annals of Medicine. 2024. Vol. 56, №1. P. 1-23. DOI: 10.1080/07853890.2024.2396558.
6. Mishra K., Alsbeih G. Appraisal of biochemical classes of radioprotectors: evidence, current status and guidelines for future development // 3 Biotech. 2017. Vol. 7, № 5. P. 1-16. DOI: 10.1007/s13205-017-0925-0.
7. Rump A., Becker B., Eder S. et al. Medical management of victims contaminated with radionuclides after a “dirty bomb” attack // Military Medical Research. 2018. Vol. 5, № 27. P. 1-10. DOI: 10.1186/s40779-018-0174-5.
8. Rump A., Ostheim P., Eder S. et al. Preparing for a “dirty bomb” attack: the optimum mix of medical countermeasure resources // Military Medical Research. 2021. Vol. 8, № 3. P. 1-16. DOI: 10.1186/s40779-020-00291-3.

9. Al-Ibraheem A., Moghrabi S., Abdikadir A. et al. An Overview of Appropriate Medical Practice and Preparedness in Radiation Emergency Response // Cureus. 2024. Vol. 16, № 6. P. e61627. DOI: 10.7759/cureus.61627.
10. Yan T., Lin G., Wang M. et al. Pharmacological treatment of inhalation injury after nuclear or radiological incidents: The Chinese and German approach // Military Medical Research. 2019. Vol. 6, № 1. P. 1-10. DOI: 10.1186/s40779-019-0200-2.
11. Satyamitra M., DiCarlo A., Hollingsworth B. et al. Development of Biomarkers for Radiation Biodosimetry and Medical Countermeasures Research: Current Status, Utility, and Regulatory Pathways // Radiation Research. 2021. Vol. 197, № 5. P. 514-532. DOI: 10.1667/rade-21-00157.1.
12. Pandya J., Stricklin A., Noel C. et al. Health System Preparedness for Nuclear and Radiological Disasters: A Review // Disaster Medicine and Public Health Preparedness. 2025. Vol. 19, P. 1-11. DOI: 10.1017/dmp.2025.8.
13. Nazari S., Baniyaghoobi F., Afzali M. et al. On-Site health management requirements in radiological and nuclear disasters: A systematic review // Trauma Monthly. 2024. Vol. 29, № 1. P. 1003-1019. DOI: 10.30491/tm.2024.401445.1606.
14. Obrador E., Salvador R., Villaescusa J. et al. Radioprotection and Radiomitigation: From the Bench to Clinical Practice // Biomedicines. 2022. Vol. 8, № 11. P. 1-57. DOI: 10.3390/biomedicines8110461.
15. Obrador E., Salvador-Palmer R., Villaescusa J. et al. Nuclear and Radiological Emergencies: Biological Effects, Countermeasures and Biodosimetry // Antioxidants. 2022. Vol. 11, № 6. P. 1098. DOI: 10.3390/antiox11061098.
16. Liu L., Liang Z., Ma S. et al. Radioprotective countermeasures for radiation injury (Review) // Molecular Medicine Reports. 2023. Vol. 27, № 3. P. 1-14. DOI: 10.3892/mmr.2023.12953.
17. Montoro A., Obrador E., Mistry Dh. et al. Radioprotectors, radiomitigators, and radiosensitizers. Radiobiology textbook. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 571-628.
18. Mishra K.N., Moftah B.A., Alsbeih G.A. Appraisal of mechanisms of radioprotection and therapeutic approaches of radiation countermeasures // Biomedicine & Pharmacotherapy. 2018. Vol. 106. P. 610-617.
19. Al-Ibraheem A., Moghrabi S., Abdikadir A. et al. An overview of appropriate medical practice and preparedness in radiation emergency response // Cureus. 2024. Vol. 16, № 6.
20. Nocci M., Bortolin M., Hertelendy AJ. et al. Bridging the preparedness gap: a systematic review of recommended stockpile items for radiological and nuclear emergencies // BMC Emergency Medicine. 2025. Vol. 25, № 1. P. 1-27.
21. National stockpiles for radiological and nuclear emergencies: policy advice. WHO, 2023. 66 p.
22. Гребенюк А.Н., Гладких В.Д. Современное состояние и перспективы разработки лекарственных средств для профилактики и ранней терапии радиационных поражений // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59, № 2. С. 132-149. DOI: 10.1134/S0869803119020085.
23. Пономарева Т.В., Кальницкий С.А., Водоватов А.В. Фармакологическая защита пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований // Биотехносфера. 2012. № 3-4 (21-22). С. 2-9.
24. Пономарева Т.В., Романович И.К., Бисениекс Э.А. и др. Дигидропиридины в лечении и профилактике лучевых поражений. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2018. Т. 2. 474 с.
25. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / Под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2016. Т. 1. 448 с.
26. Iodine thyroid blocking. Guidelines for use in planning for and responding to radiological and nuclear emergencies. Geneva: WHO, 2017. 46 p.
27. Ильин Л.А., Архангельская Г.В., Лихтарев И.А. Инструкция по проведению йодной профилактики в случае аварии ядерного реактора. Утверждена МЗ СССР 27 декабря 1967 г.

Поступила: 29.10.2025

Горский Григорий Анатольевич – кандидат медицинских наук, заместитель директора по инновационной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0001-7310-9718

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 8, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: a.biblin@niirg.ru
ORCID: 0000-0002-3139-2479

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-5191-7535

Вишнякова Надежда Михайловна – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; профессор, кафедра коммунальной гигиены, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И Мечникова, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0001-7165-4923

Для цитирования: Горский Г.А., Библин А.М., Водоватов А.В., Вишнякова Н.М. Номенклатура медицинских средств противорадиационной защиты, применяемых при крупномасштабных радиационных авариях // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 70–82. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-70-82

Nomenclature of radioprotective medical agents for major radiation accidents

Grigory A. Gorsky^{1,2}, Artem M. Biblin¹, Aleksandr V. Vodovatov^{1,3}, Nadezhda M. Vishnyakova^{1,2}

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

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

³ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

The widespread use of nuclear and radiation technologies necessitates preparedness for response to radiological emergencies. The application of medical countermeasures aimed at mitigating the adverse effects of ionizing radiation is a key element of risk management and reduction strategies, particularly during the early phases of large-scale radiation accidents among emergency response personnel. Medical agents for radiation protection are used for preventive and therapeutic purposes in cases of external, internal, or combined exposure. The aim of this study is to substantiate the choice of modern medical countermeasures for radiological protection and their protocols for application across various radiation accident scenarios. Materials and Methods: A review of Russian and international scientific publications, normative and methodological documents, and official guidelines for the period 2010–2025 was conducted. Results and Discussion: The main scenarios requiring the use of medical countermeasures for radiation protection were identified. The principal groups of drugs, their mechanisms of action, and roles within the medical radiation protection system were determined. A comparative analysis of domestic and foreign nomenclature of radiation protection agents was performed. Conclusion: It was established that the Russian nomenclature of medical countermeasures is more universal and covers a wider range of radiological emergency scenarios compared with foreign systems. The choice of specific preparations should be determined case by case, depending on the type of accident, radiological conditions, and radionuclide composition of releases. Expansion of the range and stockpiling of medical countermeasures should be given particular attention as part of emergency preparedness activities.

Key words: radiation accident, radioprotectors, radiomitigators, emergency response, potassium iodide, iodine prophylaxis.

Authors' personal contribution

Grigory A. Gorsky designed the study, drafted the manuscript, and prepared the final version.

Artem M. Biblin analyzed data, conducted literature search, prepared draft of the manuscript.

Aleksandr V. Vodovatov analyzed data, conducted literature search, prepared draft of the manuscript.

Vishnyakova N.M. analyzed data, prepared draft of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025: “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological well-being, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Improvement of the system of measures and regulatory and methodological base to ensure emergency preparedness and response of Rospotrebnadzor bodies and organizations in the event of radiation accidents of various types in order to optimize radiation protection of the population of the Russian Federation”.

References

1. 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). DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-4-80-88.

2. Samoilov AS, Romanovich IK, Grachev MI, Salenko YuA, Barkovsky AN, Repin VS, et al. On the issue of coordination of the activities of forces and means of organizations and institutions of the Federal Medical and Biological Agency of Russia and Rospotrebnadzor in emergency situations of a radiation nature. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 96-105. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-96-105.
3. Khalimov YuSh, Grebenyuk AN, Karamullin MA, Matveyev SYu, Vlasenko AN. Modern possibilities of therapeutic aid in the time of mass sanitary losses of radiation profile. *Voenno-meditsinskiy zhurnal = Military Medical Journal*. 2012;33(2): 24–32. (In Russian).
4. Grebenyuk AN., Legeza VI., Tarumov RA. Radiomitigators: prospects for use in medical radiation protection. *Voenno-meditsinskiy zhurnal = Military Medical Journal*. 2014;33(6): 39–43. (In Russian).
5. Islam M, Sultana N, Liu C, Mao A, Katsume T, Wang B. Impact of dietary ingredients on radioprotection and radiosensitization: a comprehensive review. *Annals of Medicine*. 2024;56(1): 1-23. DOI: 10.1080/07853890.2024.2396558.
6. Mishra K, Alsbeih G. Appraisal of biochemical classes of radioprotectors: evidence, current status and guidelines for future development. *3 Biotech*. 2017;7(5): 1-16. DOI: 10.1007/s13205-017-0925-0.
7. Rump A, Becker B, Eder S, Lamkowski A, Abend M, Port M. Medical management of victims contaminated with radionuclides after a “dirty bomb” attack. *Military Medical Research*. 2018;5(27): 1-10. DOI: 10.1186/s40779-018-0174-5.

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

8. Rump A, Ostheim P, Eder S, Hermann C, Abend M, Port M. Preparing for a “dirty bomb” attack: the optimum mix of medical countermeasure resources. *Military Medical Research*. 2021;8(3): 1-16. DOI: 10.1186/s40779-020-00291-3.
9. Al-Ibraheem A, Moghrabi S, Abdulkadir A, Safi H, Kazzi Z, Al-Balooshi B, et al. An Overview of Appropriate Medical Practice and Preparedness in Radiation Emergency Response. *Cureus*. 2024;16(6): e61627. DOI: 10.7759/cureus.61627.
10. Yan T, Lin G, Wang M, Lamkowski A, Port M, Rump A. Pharmacological treatment of inhalation injury after nuclear or radiological incidents: The Chinese and German approach. *Military Medical Research*. 2019;6(1): 1-10. DOI: 10.1186/s40779-019-0200-2.
11. Satyamitra M, DiCarlo A, Hollingsworth B, Winters T, Taliaferro L. Development of Biomarkers for Radiation Biodosimetry and Medical Countermeasures Research: Current Status, Utility, and Regulatory Pathways. *Radiation Research*. 2021;197(5): 514-532. DOI: 10.1667/rade-21-00157.1.
12. Pandya J, Stricklin A, Noel C, Hockaday S, Russell B, Ryan B, et al. Health System Preparedness for Nuclear and Radiological Disasters: A Review. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*. 2025;19: 1-11. DOI: 10.1017/dmp.2025.8.
13. Nazari S, Baniyaghoobi F, Afzali M, Alazmani NF, Jafarkhani M. On-Site health management requirements in radiological and nuclear disasters: A systematic review. *Trauma Monthly*. 2024;29(1): 1003-1019. DOI: 10.30491/tm.2024.401445.1606.
14. Obrador E, Salvador R, Villaescusa J, Soriano J, Estrela J, Montoro A. Radioprotection and Radiomitigation: From the Bench to Clinical Practice. *Biomedicines*. 2020;8(11): 1-57. DOI: 10.3390/biomedicines8110461.
15. Obrador E, Salvador-Palmer R, Villaescusa J, Gallego E, Pellicer B, Estrela J, et al. Nuclear and Radiological Emergencies: Biological Effects, Countermeasures and Biodosimetry. *Antioxidants*. 2022;11(6): 1098. DOI: 10.3390/antiox11061098.
16. Liu L, Liang Z, Ma S, Li L, Liu X. Radioprotective countermeasures for radiation injury (Review). *Molecular Medicine Reports*. 2023;27(3): 1-14. DOI: 10.3892/mmr.2023.12953.
17. Montoro A, Obrador E, Mistry D, Forte GI, Bravatà V, Minafra L, et al. Radioprotectors, Radiomitigators, and Radiosensitizers. In: Baatout S. Ed. *Radiobiology Textbook*. Cham: Springer; 2023. P. 571-628.
18. Mishra K, Moftah B, Alsbeih G. Appraisal of mechanisms of radioprotection and therapeutic approaches of radiation countermeasures. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2018;106: 610-617. DOI: 10.1016/j.bioph.2018.06.150.
19. Al-Ibraheem A, Moghrabi S, Abdulkadir A, Safi H, Kazzi Z, Al-Balooshi B, et al. An Overview of Appropriate Medical Practice and Preparedness in Radiation Emergency Response. *Cureus*. 2024;16(6): 1-16. DOI: 10.7759/cureus.61627.
20. Nocci M, Bortolin M, Hertelendy A, Al Shaikh E, Davis T, Serale M, et al. Bridging the preparedness gap: a systematic review of recommended stockpile items for radiological and nuclear emergencies. *BMC Emergency Medicine*. 2025;25(1): 1-27. DOI: 10.1186/s12873-025-01357-y.
21. National stockpiles for radiological and nuclear emergencies: policy advice. WHO; 2023. 66 p.
22. Grebenyuk AN, Gladkikh VD. Current status and prospects for the development of drugs for the prevention and early treatment of radiation injuries. *Radiatsionnaya biologia. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2019;59(2): 132-149. (In Russian).
23. Ponomareva TV, Kalnitsky SA, Vodovatov AG. Patients pharmaceutical protection in diagnostic radiology. *Biotehnosfera = Biotehnosfera*. 2012;(3-4): 2-9. (In Russian).
24. Ponomareva TV, Romanovich IK, Bisenieks EA, Vartanyan LP, Ershov EB, Merkushev GN. Dihydropyridines for the Treatment and Prevention of Radiation Injuries. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor PV Ramzaev; 2018. Vol. 2. 474 p. (In Russian).
25. Radiological and Hygienic Issues of the Mitigation of the Chernobyl NPP Accident Consequences. Ed.: GG Onishchenko, AYu Popova. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor PV Ramzaev; 2016. Vol. 1. 448 p. (In Russian).
26. Iodine thyroid blocking. Guidelines for use in planning for and responding to radiological and nuclear emergencies. Geneva: WHO; 2017. 46 p.
27. Ilyin LA, Arkhangelskaya GV, Likhtarev IA. Instructions for Iodine Prophylaxis in the Event of a Nuclear Reactor Accident. Approved by the USSR Ministry of Health on 27 December 1967 (In Russian).

Received: October 29, 2025

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

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

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, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0002-5191-7535

Nadezhda M. Vishnyakova – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing; Professor of the Department of Hygiene of the conditions of education, training, labor and radiation hygiene of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0001-7165-4923

For citation: Gorsky G.A., Biblin A.M., Vodovatov A.V., Vishnyakova N.M. Nomenclature of radioprotective medical agents for major radiation accidents. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 70–82. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-70-82

Оценка морфометрических характеристик гипофиза и окружающих его тканей для создания дозиметрической модели

Шарагин П.А.¹, Толстых Е.И.¹, Шишкина Е.А.^{1,2}

¹ Южно-Уральский Федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Облучение гипофиза может увеличивать риск возникновения гормонозависимых раков, например, рака молочной железы. Гипофиз расположен в гипофизарной ямке клиновидной кости и может облучаться остеотропными радионуклидами, такими как ⁹⁰Sr. Международная комиссия по радиологической защите не выделяет гипофиз как отдельный орган при расчете доз облучения от инкорпорированных радионуклидов. В связи с этим актуальной задачей является создание дозиметрической модели, которая имитирует геометрию тканей источников – костей черепа, ткани мишени – гипофиза и прилегающих тканей. Такая модель позволит рассчитывать коэффициенты перехода от активности радионуклида в кости к мощности дозы в гипофизе. Для построения модели необходимо провести систематический обзор данных о размерах гипофиза и окружающих тканей. Цель исследования: оценить морфометрические характеристики, необходимые для построения вычислительного дозиметрического фантома гипофиза и окружающих его тканей для людей следующих возрастных групп: новорожденный, 1 год, 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослые. Материалы и методы: В состав модели предполагается включить, структуры в пределах 1,5 см вокруг гипофиза. Поэтому на основе опубликованных результатов измерений оценивались характеристики следующих тканей: часть головного мозга, содержащее клиновидной пазухи, сосуды вокруг гипофиза, гипофиз, часть клиновидной кости. Результаты исследования и обсуждение: Для всех возрастных групп были оценены характеристики моделируемых объектов, для турецкого седла они варьировали в пределах 3,4–13,3 мм, а для гипофиза – 3,8–13,6 мм. Эти значения основаны на исследованиях ~ 5000 человек. Размеры сосудистых синусов оценены в пределах 1–1,7 мм, толщина оболочек гипофиза – 0,57 мм. Толщина кортикальной кости – 0,75 мм, доля костной ткани в объеме губчатой кости – 39 %. Заключение: Результаты настоящей работы, будут использованы для создания трёхмерных вычислительных дозиметрических фантомов гипофиза и окружающих тканей для разных возрастных групп.

Ключевые слова: вычислительные фантомы, внутреннее облучение, гипофиз, турецкое седло.

Введение

Изучение орган-специфичных радиогенных рисков онкологий в эпидемиологических когортах традиционно проводится относительно доз облучения этих органов. Однако отдаленные стохастические эффекты малых и средних доз могут быть иммuno- или гормоно-опосредованы. Иными словами, орган-мишень может не совпадать с локализацией опухоли и это может значимо повлиять на анализ радиационных рисков в случае неравномерного облучения организма. В частности, исследования избыточного относительного риска заболеваемости гормонозависимым раком молочной железы у аварийно-облученных лиц Уральского региона [1] ранее проводились относительно доз облучения молочной железы. При этом известно, что облучение гипофиза может приводить к его дисфункции [2–6], что в свою очередь может увеличивать риск возникновения гормонозависимых раков, таких как рак молочной железы [7, 8].

Гипофиз расположен на нижней поверхности головного мозга, в гипофизарной ямке турецкого седла клиновидной кости и может облучаться остеотропными радионуклидами.

В частности, члены когорты аварийно-облученных лиц Уральского региона подвергались сочетанному воздействию внешнего и внутреннего облучения, и одним из основных дозообразующих радионуклидов был ⁹⁰Sr [9]. ⁹⁰Sr является долгоживущим бета-излучателем, который, при попадании в организм накапливается в костной ткани, что может приводить к хроническому облучению гипофиза. Таким образом, доза на гипофиз может быть существенно выше, чем доза облучения молочной железы. Учет доз на гипофиз может привести к переоценке радиогенных рисков.

В настоящее время Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) не выделяет гипофиз как отдельный орган при расчете поглощенных доз облучения от инкорпорированных радионуклидов [10]. Таким образом, встает проблема разработать метод оценки доз внутреннего облучения гипофиза остеотропными радионуклидами. Для этого нужно создать дозиметрическую модель, имитирующую геометрию тканей источников – костей черепа, ткани мишени – гипофиза, а также прилегающих тканей, которые могут влиять на перенос излучения – головного мозга, мозговых оболочек и кровеносных сосудов. Такая модель необходима для моделирования транспорта излучений, что

Шарагин Павел Алексеевич

Южно-Уральский Федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

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

позволит рассчитать коэффициенты перехода от активности радионуклида в кости к мощности дозы, поглощённой в гипофизе. Построение дозиметрической модели требует изучения доступных данных о размерах гипофиза и турецкого седла с учетом возрастных изменений. В рамках настоящей работы был проведен систематический обзор доступных медико-биологических источников информации.

Цель исследования – оценить основные морфометрические характеристики, необходимые для построения вычислительного дозиметрического фантома гипофиза и окружающих его тканей для людей следующих возрастных групп: новорожденный, 1 год, 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослые.

Материалы и методы

Объекты моделирования

В состав дозиметрической модели предполагается включить, анатомические структуры, расположенные в пределах 1,5 см вокруг гипофиза. Эта величина соответствует средней длине свободного пробега электронов с энергией ~ 2 МэВ (максимальная энергия спектра излучения $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$) в тканях мозга в приближении непрерывного замедления. Поэтому оценивались характеристики следующих тканей: часть головного мозга, содержащее клиновидной пазухи, сосуды вокруг гипофиза, гипофиз, трабекулярная кость в составе ската клиновидной кости, кортикальная кость в составе ската клиновидной кости, кортикальная кость в составе турецкого седла и клиновидной пазухи.

Методы поиска публикаций

Исследование включало поиск публикаций, по ключевым словам, в поисковых системах Google, Yandex, а также в специализированных системах eLIBRARY.RU, PubMed, Academia.edu, ScienceDirect. Ключевые слова и фразы: «турецкое седло», «форма турецкого седла», «морфометрия клиновидной кости», «гипофиз», «измерения», «оболочки гипофиза», «сосуды головного мозга», «сагittalный срез», «шишковидная железа», «pituitary gland», «head tissues density», «sellae turcicae», «clinoid bone», «clinoid process», «sellae turcicae 3-D model». В качестве источников информации принимались научные статьи в рецензируемых журналах, монографии, гистологические атласы. Для анализа принимались результаты измерений с использованием различных техник: результаты анализа КТ, микро-КТ и МРТ изображений компьютерной томографии (КТ), компьютерной микротомографии (микро-КТ), магнитно-резонансной томографии (МРТ), гистологических срезов, анализ патологоанатомического материала. Важно отметить, что при анализе морфометрических характеристик результаты измерений, основанных на данных аутопсий, имели наибольший приоритет. Все обнаруживаемые источники информации регистрировались в виде электронной таблицы с указанием типа источника (оригинальная статья, первичные данные из открытых источников, литературный обзор или метаанализ, и т.д.), даты обращения и причин принятия/отказа.

Представление данных

Результаты анализа основных морфометрических характеристик гипофиза и турецкого седла систематизировались в электронных таблицах в программе MS Excel в виде справочников с указанием методов исследования, количества обследованных, источника информации; для среднегрупповых оценок, помимо средней оценки, указывалось

стандартное отклонение и/или диапазон измеренных значений. Усреднение опубликованных данных проводилось с учетом количества измеренных людей в исследовании. Поэтому каждому результату приписывался взвешивающий коэффициент (W_N). W_N равен 1 если исследование включает измерения более 12 людей/образцов. В противном случае $W_N=N/12$. Взвешивающие коэффициенты нормировались так, чтобы их сумма была равна 1. Графическое представление данных осуществлялось в программе SigmaPlot 12 (лицензионное программное обеспечение).

Критерии включения опубликованных результатов измерений

Использовались результаты измерений людей/образцов, которых авторы исследований определяли, как «здоровых», также в анализ включены результаты измерений, проведенных на контрольных группах. Этническая принадлежность субъектов и половые различия не учитывались в рамках данного исследования. Таким образом, данные для разных полов и этнических групп были объединены и анализировались вместе. Для анализа принимались результаты измерений с использованием различных техник: результаты анализа КТ, микро-КТ и МРТ изображений гистологических срезов, анализ патологоанатомического материала. Важно отметить что при анализе морфометрических характеристик, результаты измерений, основанных на данных аутопсий, имели наибольший приоритет.

В группу новорожденных было решено включить данные для плода от 38 недели развития и младенцев младше 0,5 лет. Для годовалого ребенка использовались данные по детям в возрасте 0,5–1,5 лет. Для других возрастных групп принимались результаты измерений людей, отличающихся от референтного возраста не более чем на 2 года. Для взрослых анализировались данные по людям старше 18 лет.

Критерии исключения

Только первичные данные принимались во внимание, то есть для оценки морфометрических характеристик гипофиза не использовались результаты литературных обзоров или сопоставление с неоригинальными данными при обсуждении результатов исследований. В исследование не включались публикации с неполным описанием целей, объектов и методов. В исследование не включались тезисы конференций, материалы сборников и прочие не рецензируемые публикации. В исследование не включались данные из тезисов публикаций (если полный текст не был доступен). В исследование не включались усредненные оригинальные данные без указания стандартного отклонения или диапазона измеренных значений.

На рисунке 1 представлена схема процесса отбора и исключения источников данных, используемых для вычисления основных усредненных морфометрических характеристик турецкого седла и гипофиза в настоящем исследовании. Публикации, исключенные до просмотра, – это в основном нерелевантные источники, соответствующие ключевым словам, но не соответствующие цели исследования. После просмотра оставшихся источников были оставлены только те, что удовлетворяли вышеперечисленным критериям включения. На последнем этапе проверки данных использовались критерии исключения.



Рис 1. Схема процесса отбора и исключения источников данных
[Fig 1.] Diagram of the process of selecting and excluding data sources]

Характеристики моделируемых структур

В литературе описана классификация форм турецкого седла, согласно которой выделяют несколько его типов, в зависимости от формы и положения клиновидной пазухи относительно турецкого седла [11, 12]. Также существует классификация турецкого седла по форме его передней и задней стенок [13-17]. В рамках настоящей работы по опубликованным данным были определены наиболее часто встречающиеся типы турецкого седла согласно обоим этим классификациям. Было принято решение моделировать турецкое седло нормального типа с клиновидной пазухой седловидного типа, т.е. имеющее вид, схематично представленный на рисунке 2.

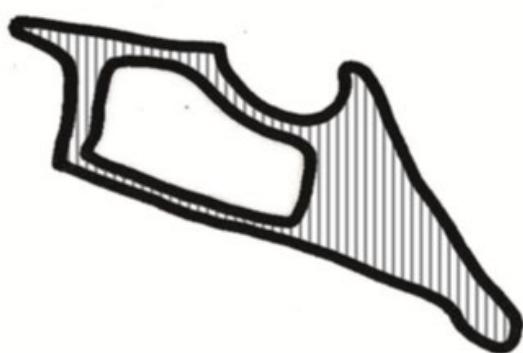


Рис 2. Схема турецкого седла нормального типа с клиновидной пазухой седловидного типа [11]

[Fig 2.] Schematic image of a normal sella turcica with a sellar type clinoid sinus (sagittal projection) [11] and modelled area (inside the dotted line)]

По опубликованным данным оценивались стандартные морфометрические характеристики линейных размеров турецкого седла, а именно:

Длина (L_s) – расстояние между бугорком седла и наивысшей точкой клиновидного отростка

Глубина (D_s) – линия проведенная перпендикулярно от центральной точки длины турецкого седла к основанию гипофизарной ямки

Ширина (W_s) – расстояние между средними точками на боковых поверхностях дна турецкого седла.

Дополнительно, оценивалась толщина кортикального слоя – $St.Th$ и доля костной ткани в объёме трабекулярной кости – BV/TV . Так как в моделируемый участок клиновидной кости входит часть клиновидной пазухи, были оценены особенности её строения для разных возрастных групп.

Измерения формы поверхности турецкого седла по опубликованным КТ снимкам гипофиза проводились в компьютерной программе GraphDigitizer [18].

Усреднение результатов измерений КТ снимков проводилось с использованием оригинального кода, написанного на языке Python 3.11.1.

Деформация трёхмерной модели поверхности турецкого седла проводилась с использованием программного обеспечения Blender 4.3.

По опубликованным данным оценивались следующие стандартные морфометрические характеристики линейных размеров гипофиза:

Длина – расстояние между нижней и верхней точкой гипофиза на продольном среднем сечении

Ширина – расстояние между боковыми поверхностями гипофиза на поперечном сечении

Высота – расстояние между передним и задним концом гипофиза на продольном сечении (перпендикулярно высоте)

Также оценены размеры сосудистых синусов и мозговых оболочек, которые заполняли пространство между гипофизом и турецким седлом.

Результаты и обсуждение

Для оценки усредненных значений основных морфометрических характеристик турецкого седла было проанализировано 17 литературных источников, включающих результаты измерений 2929 человек.

Полный набор основных морфометрических параметров турецкого седла был найден для взрослых и для новорожденных. Для детей в возрасте 5, 10, 15 лет найдены результаты измерений длины и глубины турецкого седла. Ширина турецкого седла для этих возрастных групп вычислялась линейной

интерполяцией данных для взрослых и новорожденных, в приближении, что средний возраст взрослых субъектов равен 45 лет. Для детей в возрасте 1 год не было найдено опубликованных результатов измерений турецкого седла, поэтому для данной возрастной группы все параметры были получены линейной интерполяцией данных для соседних возрастных групп: новорожденных и 5-летних. Опубликованные результаты измерений основных линейных размеров турецкого седла, их усреднение и интерполяция усредненных значений представлены на рисунке 3 на примере длины и глубины.

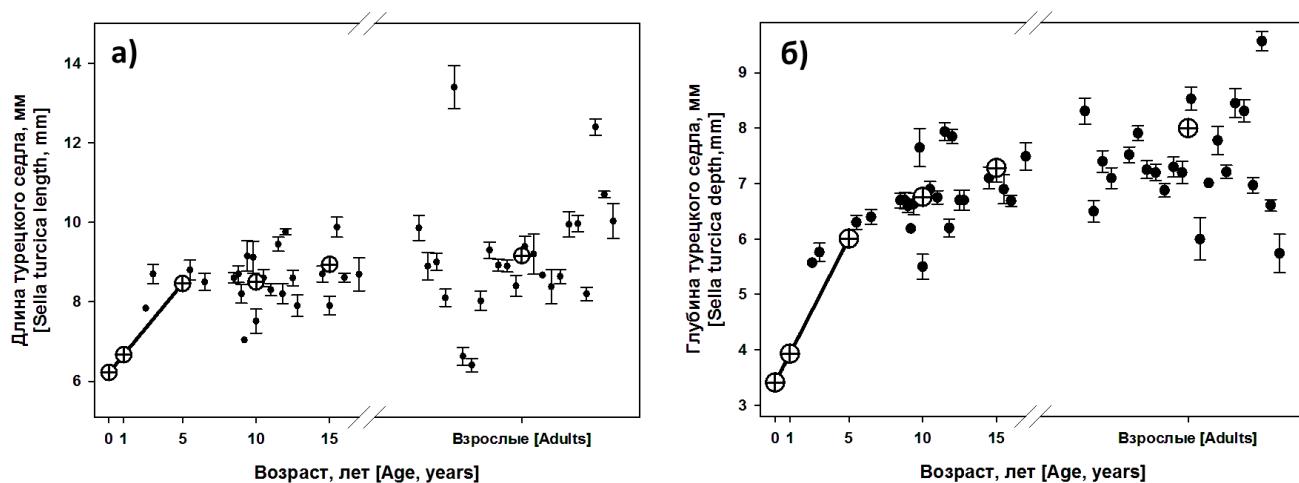


Рис 3. Усреднение опубликованных характеристик турецкого седла на примере: длины (а) и глубины (б). Чёрными точками обозначены результаты измерений из опубликованных работ, усредненные значения характеристик для референсных возрастов показаны белыми точками. Усы обозначают ошибку среднего

[**Fig 3.** Averaging of the published characteristics of the sella turcica by the example of length (a) and depth (b). The black dots indicate the measurement results from the published papers, the average values of the characteristics for the reference ages are shown by white dots. The whiskers indicate the error of mean]

Как показано на рисунке 2, усредненные значения высоты и глубины размеров турецкого седла для большинства возрастных групп основаны на большом количестве опубликованных результатов измерений. Вариабельность усредненных значений размеров для новорожденных и годовалых принималась равной среднему значению для прочих возрастных

групп. Вариабельность ширины турецкого седла для детей принималась такой же как для взрослых. Усредненные значения основных морфометрических характеристик турецкого седла, их вариабельность, а также источники литературы, которые использовались для их вычисления представлены в таблице 1.

Усредненные линейные размеры турецкого седла, мм (среднее значение ± стандартное отклонение)

Table 1

Average linear dimensions of sella turcica, mm (mean ± standard deviation)]

Возрастная группа [Age group]	N*	Длина [Length]	Ширина [Width]	Глубина [Depth]	Источники [References]
0-24 недели [0-24 weeks]	7	6,22 ± 1,20	9,9 ± 1,80	3,40 ± 0,61	19
1 год [1 year]	–	6,67 ± 1,29	9,98 ± 1,81	3,93 ± 0,71	–
5 лет [5 years]	165	8,46 ± 1,61	10,28 ± 1,87	6,01 ± 0,94	17; 20-22
10 лет [10 years]	780	8,51 ± 1,65	10,65 ± 1,93	6,76 ± 1,14	21-25
15 лет [15 years]	370	8,94 ± 1,65	11,03 ± 2,00	7,28 ± 1,35	15; 17; 20; 21
Взрослые [Adults]	1657	9,16 ± 2,03	13,29 ± 2,41	8,00 ± 1,68	12, 14, 15, 17, 20-32

*N – количество людей/образцов, использованных в анализируемых источниках литературы [*N - number of people/samples used in the analyzed literature sources]

Как показано в таблице 1, средние размеры турецкого седла оценены для новорожденных в пределах 5-9 мм и увеличиваются с возрастом до 8-12 мм, что отражает хорошо изученные закономерности роста скелета. Полученные усредненные значения размеров турецкого седла для взрослых хорошо соотносятся с опубликованными результатами метаанализа [33].

Как уже упоминалось выше, форма турецкого седла весьма вариабельна. Для получения усредненной формы турецкого седла использовались 11 опубликованных КТ-изображений этой области в сагittalной проекции для

взрослых [11, 14, 20, 21, 25, 34, 35]. Все изображения были приведены к одному масштабу путем их деформации таким образом, чтобы каждое изображение соответствовало усредненным значениям длины турецкого седла (табл. 1). На каждом снимке на кривой поверхности турецкого седла были выбраны опорные точки, соединение которых может описать эту кривую (рис. 4а). Координаты точек рассчитывались в радиальной системе координат. Радиальные координаты опорных точек 11-ти изображений были усреднены внутри секторов в 20 градусов (как показано на рис. 4б).

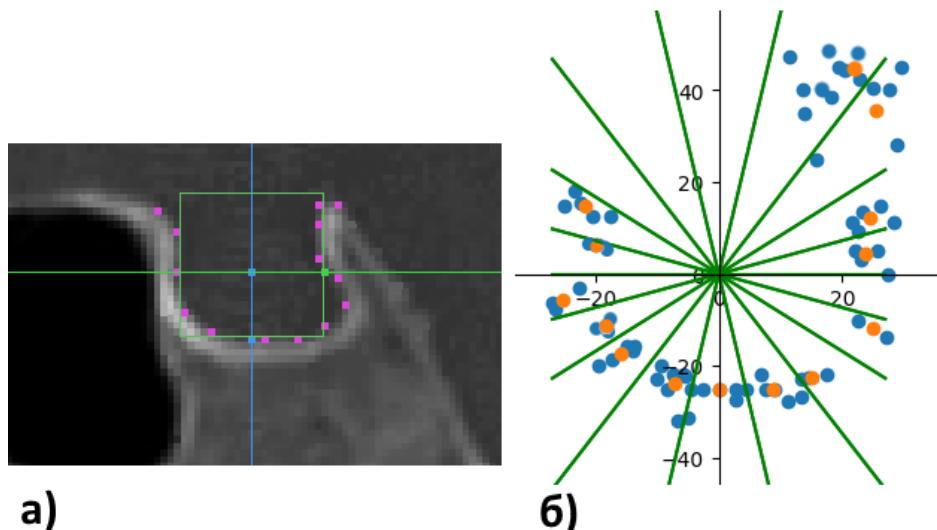


Рис 4. Оценка формы турецкого седла в сагиттальной проекции. Слева – пример нанесения опорных точек на изображение турецкого седла [34], справа – усреднение координат опорных точек турецкого седла (синие точки – координаты опорных точек, снятых с изображений турецкого седла, зеленые линии – сектора размером в 20 градусов, оранжевые точки – усредненные координаты точек внутри каждого сектора)

[**Fig. 4.** Assessment of the shape of the sella turcica from sagittal projection. On the left is an example of drawing the reference points to an image of the sella turcica [34], on the right is an averaging of the sella turcica reference points coordinates (the blue dots are the coordinates of the reference points taken from the images, the green lines are sectors measuring 20 degrees, the orange dots are the averaged coordinates of points inside each sector)]

Для оценки формы поверхности турецкого седла во всех проекциях, трехмерная модель турецкого седла [36] была деформирована таким образом, чтобы соответствовать усред-

ненным морфометрическим характеристикам и усредненной форме турецкого седла в сагиттальной проекции. Деформация модели турецкого седла представлена на рисунке 5.

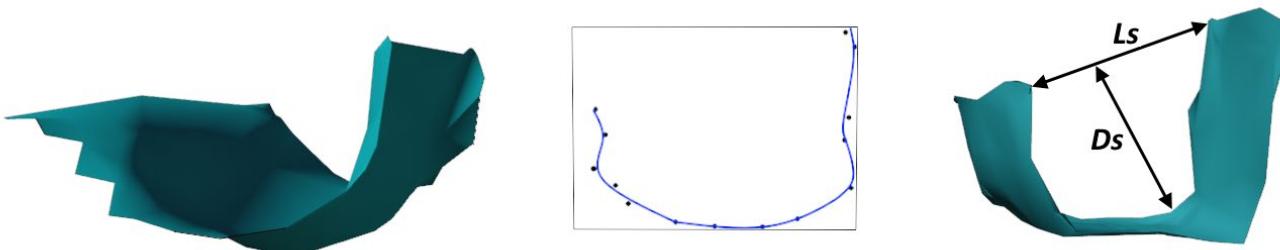


Рис 5. Деформация трехмерной модели поверхности турецкого седла [36]. Слева сагиттальная проекция участка исходной модели, описывающего турецкое седло, в центре – усредненная форма турецкого седла, справа – результат деформации модели с учетом средних линейных размеров

[**Fig. 5.** Deformation of the three-dimensional model of the sella turcica surface [36]. On the left is the sagittal projection of the section of the original model describing the sella turcica, in the center is the average shape of the sella turcica, on the right is the result of model deformation taking into account the average linear dimensions]

На рисунке 5 слева представлена деформированная модель турецкого седла; для деформации данную модель накладывали на точки, описывающие усредненную форму турецкого седла в сагиттальной проекции, после чего изменяли форму модели таким образом, чтобы её поверхность располагалась наиболее близко к этим точкам. Таким образом была получена усредненная трёхмерная модель поверхности турецкого седла взрослого. Форма турецкого седла, оценённая для взрослых, масштабировалась для прочих возрастных групп так, чтобы соответствовать значениям L_{si} и D_{si} .

Скат клиновидной кости

Форма ската клиновидной кости в сагиттальной проекции была оценена по 11 доступным КТ изображениям турецкого седла, использованным ранее. Форма ската клиновидной кости в прочих проекциях не учитывалась в рамках настоящей работы.

Костная ткань

Толщина кортикального слоя ската клиновидной кости оценена по опубликованным данным и равна 0,75 мм [37]. Для турецкого седла не было найдено опубликованных результатов измерений толщины кортикального слоя кости.

Для трабекулярной кости в составе турецкого седла и ската клиновидной кости не было найдено результатов измерений BV/TV, эти значения принимались равными таким для верхней челюсти. BV/TV для верхней челюсти принималось одинаковым для всех возрастов, было оценено по опубликованным данным и равно 39 % [38, 39].

Гипофиз

Для оценки усредненных значений основных морфометрических характеристик гипофиза было проанализировано 8 литературных источников включающих результаты измерений 2388 человек. На рисунке 6 представлены значения характеристик гипофиза, представленные в литературе, а также их усредненные значения для референсных возрастов.

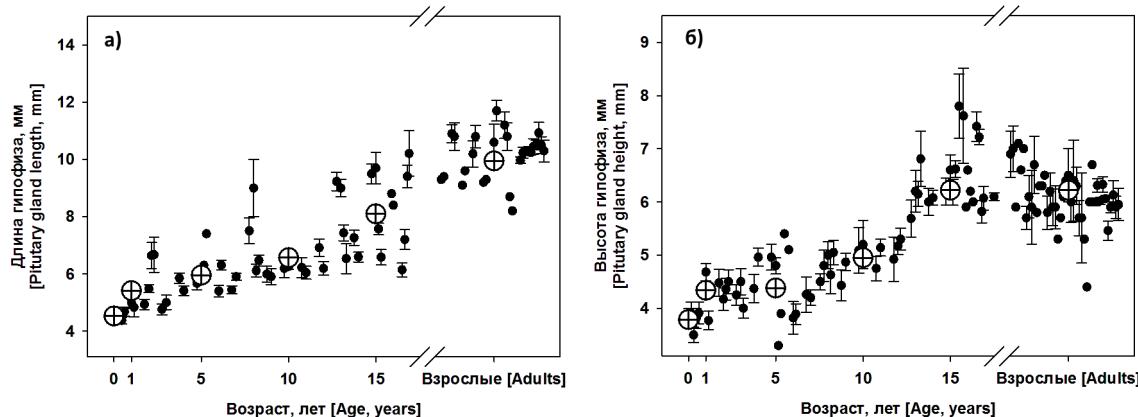


Рис. 6. Усреднение опубликованных характеристик гипофиза на примере: длины (а) и высоты (б). Чёрными точками обозначены результаты измерений из опубликованных работ, усредненные значения характеристик для референсных возрастов показаны белыми точками. Усы обозначают ошибку среднего

[**Fig. 5.** Averaging of the published characteristics of the pituitary gland by the example of length (a) and height (b). Black dots indicate the measurement results from published works, the average values of characteristics for reference ages are shown by white dots. The whiskers indicates the error of mean]

Как продемонстрировано на рисунке 6, усредненные значения линейных размеров гипофиза основаны на большом количестве опубликованных данных. Средние значения

основных морфометрических характеристик гипофиза и их вариабельность представлены в таблице 2.

Основные морфометрические характеристики гипофиза, мм (среднее значение ± стандартное отклонение)

Table 2

The main morphometric characteristics of the pituitary gland, mm (mean ± standard deviation)]

[Table 2]

Возрастная группа [Age group]	N*	Длина [Length]	Ширина [Width]	Высота [Height]	Источники [References]
0-24 недели [0-24 weeks]	66	4,53 ± 0,51	9,22 ± 1,04	3,8 ± 0,67	40; 41
1 год [1 year]	93	5,41 ± 0,95	10,4 ± 1,4	4,30 ± 0,7	40-42
5 лет [5 years]	122	5,96 ± 0,65	11,3 ± 1,64	4,40 ± 0,9	30; 32; 40-42
10 лет [10 years]	166	6,6 ± 1,05	12,6 ± 1,41	5,0 ± 1,0	40-42
15 лет [15 years]	235	8,1 ± 1,37	13,4 ± 1,7	6,2 ± 1,1	28; 30; 32; 40-42
Взрослые [Adults]	1069	9,95 ± 1,3	13,6 ± 1,8	6,2 ± 1,2	28; 30-32; 40-43

*N – количество людей/образцов использованных в анализируемых источниках литературы [*N - number of people/samples used in the analyzed literature sources]

Как показано в таблице 2, усредненные значения размеров гипофиза оценены в пределах 3,8–9,2 мм для новорожденных, и увеличиваются с возрастом до 6,2–13,6 мм для взрослых. Полученные усредненные значения размеров гипофиза для взрослых хорошо соотносятся с опубликованными результатами метаанализа [44].

Сосудистые синусы

По опубликованным данным были оценены размеры сосудистых синусов, расположенных между гипофизом и турецким седлом. В литературе описаны размеры переднего ($1,7 \pm 0,8$ мм), заднего ($1,5 \pm 0,5$ мм) и нижнего ($1,0 \pm 0,8$ мм) синуса [45]. Толщина соединительнотканной капсулы гипофиза в среднем равна $0,57 \pm 0,06$ мм согласно данным литературы [46].

Клиновидная пазуха

Согласно опубликованным данным [34, 47, 48], у большинства людей клиновидная пазуха развивается в период до 10 лет. У людей старше 10 лет она заполнена воздухом, а для детей младших возрастных групп большую часть области, где в будущем будет расположена пазуха, занимает трабекулярная кость [47].

Ограничения исследования

Представленные результаты исследования получены только для турецкого седла нормального типа с клиновидной пазухой седловидного типа. Ввиду небольшого количества изображений турецкого седла и ската клиновидной кости в сагиттальной проекции, использованных в данной работе, их усредненная форма была определена с большой погрешностью. Однако мы считаем такой результат приемлемым для создания трехмерной дозиметрической модели ввиду большой индивидуальности формы турецкого седла. В ходе работы были определены только основные морфометрические характеристики гипофиза. Мы не оценивали его форму, как и форму сосудистых синусов. Эти структуры будут смоделированы упрощенно.

Заключение

В результате данной работы были получены усредненные значения линейных размеров турецкого седла и гипофиза для людей различного возраста. Размеры турецкого седла были в пределах 3,4–13,3 мм, а гипофиза 3,8–13,6 мм. Также для взрослых оценены форма турецкого седла и ската клиновидной кости в сагиттальной проекции, толщина кортикального слоя клиновидной кости, доля костной ткани в объеме губчатой кости. Была построена трёхмерная модель поверхности турецкого седла взрослого. Путем ее масштабирования в соответствии с усредненными значениями линейных размеров турецкого седла были получены модели поверхности турецкого седла для детей различных возрастных групп. Были оценены морфометрические характеристики тканей, расположенных вблизи гипофиза: сосудистых синусов и мозговых оболочек, а также особенности развития и пневматизации клиновидной пазухи.

Морфометрические характеристики, оцененные в результате настоящей работы, будут использованы в предстоящих исследованиях для оценки параметров трёхмерных вычислительных дозиметрических фантомов гипофиза и окружающих его тканей для разных возрастных групп.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Шарагин П.А. – анализ литературы, написание статьи, редактирование статьи.

Шишкина Е.А. – разработка концепции, дизайн исследования.

Толстых Е.И. – разработка концепции, редактирование статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось в рамках НИР «Отдаленные эффекты хронического облучения населения Уральского региона».

Литература

1. Крестинина Л.Ю., Микрюкова Л.Д., Шалагинов С.А. и др. Риск заболеваемости раком молочной железы у аварийно-облучённых лиц Южного Урала // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 69–79. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-69-79.
2. Ajmal A., McKean E., Sullivan S. et al. Decreased quality of life (QoL) in hypopituitary patients: involvement of glucocorticoid replacement and radiation therapy // Pituitary. 2018. Vol. 21, № 6. P. 624–630.
3. Appelman-Dijkstra N.M., Kokshoorn N.E., Dekkers O.M. et al. Pituitary dysfunction in adult patients after cranial radiotherapy: systematic review and meta-analysis // The Journal of clinical endocrinology and metabolism. 2011. Vol. 96, № 8. P. 2330–2340.
4. Agha A., Sherlock M., Brennan S. et al. Hypothalamic-pituitary dysfunction after irradiation of nonpituitary brain tumors in adults // The Journal of clinical endocrinology and metabolism. 2005. Vol. 90, № 12. P. 6355–6360.
5. Lam K.S., Tse V.K., Wang C. et al. Effects of cranial irradiation on hypothalamic-pituitary function – a 5-year longitudinal study in patients with nasopharyngeal carcinoma // Quarterly journal of medicine. 1991. Vol. 78, № 286. P. 165–176.
6. VanKoevering K.K., Sabetsarvestani K., Sullivan S.E. et al. Pituitary dysfunction after radiation for anterior skull base malignancies: incidence and screening // Journal of neurological surgery. Part B, Skull base. 2020. Vol. 81, № 1. P. 75–81.
7. Contrera K.J., Phan J., Waguespack S.G. et al. Prevalence of pituitary hormone dysfunction following radiotherapy for sinonasal and nasopharyngeal malignancies // Head & neck. 2023. Vol. 45, № 10. P. 2525–2532. DOI: 10.1002/hed.27476.
8. Schuler L.A., O'Leary K.A. Prolactin: The Third Hormone in Breast Cancer // Frontiers in Endocrinology (Lausanne). 2022. Vol. 13, № 910978. DOI: 10.3389/fendo.2022.910978. PMID: 35784527; PMCID: PMC9244687.
9. Дёгтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьёва М.И. и др. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Течь в 1949–1956 гг. // Радиационная биология, радиоэкология. 2016. Т. 56, № 5. С. 523–534.
10. 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.
11. Pirinc B., Fazliogullari Z., Guler I. et al. Classification and volumetric study of the sphenoid sinus on MDCT images // European archives of oto-rhino-laryngology: official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS): affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery. 2019. Vol. 276, № 10. P. 2887–2894. DOI: 10.1007/s00405-019-05549-8.
12. Dwairy A.L., Mousaa S., Fataftah A. et al. Morphometric analysis of the sella turcica and sphenoid sinus: a retrospective cross-sectional study // International Journal of Morphology. 2023. Vol. 41, № 3. P. 858–862.
13. Kayalioglu G., Erturk M., Varol T. Variations in sphenoid sinus anatomy with special emphasis on pneumatization and

- endoscopic anatomic distances // Neurosciences (Riyadh). 2005. Vol. 10, № 1. P. 79-84.
14. Nagaraj T., Shruthi R., James L. et al. The size and morphology of sella turcica: A lateral cephalometric study // Journal of medicine, radiology, pathology and surgery. 2015. Vol. 1. P. 3-7.
 15. Konwar S.K., Singhla A., Bayan R. Morphological (Length, Depth, and Diameter) Study of Sella Turcica in Different Mandibular Growth Patterns in Indians // International Journal of Dental and Medical Specialty. 2016. Vol. 3, № 3. P. 4-9.
 16. AL-Mohana R.A.A.M., Muhammed F.K., Li X. et al. The bridging and normal dimensions of sella turcica in Yemeni individuals // Oral Radiology. 2022. Vol. 38. P. 162-170. DOI: 10.1007/s11282-021-00541-7.
 17. Hasan H.A., Alam M.K., Yusof A. et al. Size and morphology of sella turcica in Malay populations: a 3D CT study // Journal of Hard Tissue Biology. 2016. Vol. 25. P. 313-320. DOI: 10.2485/jhtb.25.313.
 18. GetData GraphDgitizer. URL: <http://getdata-graph-dgitizer.com> (Дата обращения 01.06.2025).
 19. Covell W.P. Growth of the human prenatal hypophysis and the hypophyseal fossa // American Journal of Anatomy. 1927. Vol. 38. P. 379-422.
 20. Axelsson S., Storhaug K., Kjaer I. Post-natal size and morphology of the sella turcica. Longitudinal cephalometric standards for Norwegians between 6 and 21 years of age // European Journal of Orthodontics. 2004. Vol. 26, № 6. P. 597-604. DOI: 10.1093/ejo/26.6.597.
 21. Abebe G., Gebremickael A., Mergu P. et al. Morphometric Analysis of the Sella Turcica and its Variation with Sex and Age among Computed Tomography Scanned Individuals in Soddo Christian Hospital, Ethiopia // International Journal of Anatomy Radiology and Surgery. 2021. Vol. 10, № 2. P. 48-51.
 22. Motwani M.B., Biranjan R., Dhole A. et al. A study to evaluate the shape and size of sella turcica and its correlation with the type of malocclusion on lateral cephalometric radiographs // IOSR Journal of Dental and Medical Sciences. 2017. Vol. 16. P. 126-132.
 23. Muhammed F.K., Abdullah A.O., Liu Y. Morphology, Incidence of Bridging, Dimensions of Sella Turcica, and Cephalometric Standards in Three Different Racial Groups // Journal of Craniofacial Surgery. 2019. Vol. 30, № 7. P. 2076-2081. DOI: 10.1097/SCS.0000000000005964.
 24. Muhammed F.K., Abdullah A.O., Liu Y. A morphometric study of the sella turcica: race, age, and gender effect // Folia morphologica. 2020. Vol. 79. P. 318-326.
 25. Issrani R., Alanazi S.H., Alrashed F.F. et al. Radiographic Analysis of Morphological Variations of Sella Turcica in Different Skeletal Patterns Among Saudi Subpopulations // International Journal of General Medicine. 2023. Vol. 16. P. 2481-2491. DOI: 10.2147/IJGM.S413903.
 26. Usman Z., Zagga A.D., Yunusa G.H. et al. Shapes and Sizes of Sella Turcica Using Computerized Tomography (CT) from Tertiary Hospital in Sokoto, Nigeria // Asian Journal of Medicine and Health. 2020. Vol. 18, № 1. P. 8-15. URL: <https://journalajmah.com/index.php/AJMAH/article/view/390> (Дата обращения 01.06.2025).
 27. Islam M., Alam M.K., Yusof A. et al. 3D CT Study of Morphological Shape and Size of Sella Turcica in Bangladeshi Population // Journal of Hard Tissue Biology. 2017. Vol. 26. P. 1-6.
 28. Ibinaiye P.O., Olarinoye-Akorede S., Kajogbola O. et al. Magnetic Resonance Imaging Determination of Normal Pituitary Gland Dimensions in Zaria, Northwest Nigerian Population // Journal of Clinical Imaging Science. 2015. Vol. 5. P. 29. DOI: 10.4103/2156-7514.157853.
 29. Önal V., Evren A., Chatzioglou G.O.N. et al. Anatomical features of sella turcica with comprehensive literature review // Revista da Associacao Medica Brasileira. 2023. Vol. 69, № 8. DOI: 10.1590/1806-9282.20230402.
 30. Jha A., Paudel N., Nepal S. et al. Normal Pituitary Gland Size and Morphology and Its Variations Related to Age and Gender: An MRI Evaluation // Journal of Nepalganj Medical College. 2020. Vol. 18, № 1. P. 36-39. DOI: 10.3126/jngmc.v18i1.35175.
 31. Lamichhane T.R., Pangeni S., Paudel S. et al. Age and gender related variations of pituitary gland size of healthy Nepalese people using magnetic resonance imaging // American Journal of Biomedical Engineering. 2015. Vol. 5, № 4. P. 130-135.
 32. Yadav P., Singhal S., Chauhan S. et al. MRI evaluation of size and shape of normal pituitary gland: Age and sex related changes // Journal of Clinical and Diagnostic Research. 2017. Vol. 11, № 12. DOI: 10.7860/JCDR/2017/31034.10933.
 33. Iskr T., Stachera B., Mozdzen' K. et al. Morphology of the Sella Turcica: A Meta-Analysis Based on the Results of 18,364 Patients // Brain Science. 2023. Vol. 13, № 8. P. 1208. DOI: 10.3390/brainsci13081208.
 34. Chen J., Pool C., Slonimsky E. et al. Anatomical Parameters and Growth of the Pediatric Skull Base: Endonasal Access Implications // Journal of Neurological Surgery Part B: Skull Base. 2022. Vol. 84, № 4. P. 336-348. DOI: 10.1055/a-1862-0321.
 35. Silveira B.T., Fernandes K.S., Trivino T. et al. Assessment of the relationship between size, shape and volume of the sella turcica in class II and III patients prior to orthognathic surgery // Surgical and Radiologic Anatomy. 2020. Vol. 42, № 5. P. 577-582. DOI: 10.1007/s00276-019-02406-5.
 36. BodyParts3D/Anatomography. URL: <https://lifescienceedb.jp/bp3d/> (Дата обращения: 17.06.2025).
 37. Lang J., Issing P. Uber Messungen am Clivus, den Foramina an der Basis cranii externa und den oberen Halswirbeln [The measurements of the clivus, the foramina on the external base of the skull and the superior vertebrae] // Annals of Anatomy. 1989. Vol. 169, № 1. P. 7-34.
 38. Pryor McIntosh L., Strait D.S., Ledogar J.A. et al. Internal Bone Architecture in the Zygoma of Human and Pan // The Anatomical Record. 2016. Vol. 299, № 12. P. 1704-1717. DOI: 10.1002/ar.23499.
 39. González-García R., Monje F. Is micro-computed tomography reliable to determine the microstructure of the maxillary alveolar bone? // Clinical Oral Implants Research. 2013. Vol. 24, № 7. P. 730-737. DOI: 10.1111/j.1600-0501.2012.02478.x.
 40. Sari S., Sari E., Akgun V. et al. Measures of pituitary gland and stalk: from neonate to adolescence // Journal of Pediatric Endocrinology and Metabolism. 2014. Vol. 27, № 11-12. P. 1071-1076. DOI: 10.1515/jpem-2014-0054.
 41. Argyropoulou M., Perignon F., Brunelle F. et al. Height of normal pituitary gland as a function of age evaluated by magnetic resonance imaging in children // Pediatric Radiology. 1991. Vol. 21, № 4. P. 247-249. DOI: 10.1007/BF02018614.
 42. Sahni D., Jit I., Harjeet. et al. Weight and dimensions of the pituitary in northwestern Indians // Pituitary. 2006. Vol. 9, № 1. P. 19-26. DOI: 10.1007/s11102-006-7503-5.
 43. Ju K.S., Bae H.G., Park H.K. et al. Morphometric study of the korean adult pituitary glands and the diaphragma sellae // Journal of Korean Neurosurgical Society. 2010. Vol. 47, № 1. P. 42-47. DOI: 10.3340/jkns.2010.47.1.42.
 44. Bonczar M., Wysiadecki G., Ostrowski P. et al. The Morphology of the Pituitary Gland: A Meta-Analysis with Implications for Diagnostic Imaging // Brain Science. 2023. Vol. 13, № 1. P. 89. DOI: 10.3390/brainsci13010089.
 45. Kosty J., Peterson R., Miriyala S. et al. An Anatomic Assessment of the Intercavernous Sinuses and Review of the Literature // Journal of Neurological Surgery Part B: Skull Base. 2022. Vol. 84, № 3. P. 266-271. DOI: 10.1055/a-1819-0144.
 46. Songtao Q., Yuntao L., Jun P. et al. Membranous layers of the pituitary gland: histological anatomic study and related clinical issues // Neurosurgery. 2009. Vol. 64, № 3 Suppl, P. ons1-ons10. DOI: 10.1227/01.NEU.0000327688.76833.F7.
 47. Fujioka M., Young L.W. The sphenoidal sinuses: radiographic patterns of normal development and abnormal findings in infants and children // Radiology. 1978. Vol. 129, № 1. P. 133. DOI: 10.1148/129.1.133.
 48. Tan H.K., Ong Y.K., Teo M.S. et al. The development of sphenoid sinus in Asian children // International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology. 2003. Vol. 67, № 12. P. 1295-1302. DOI: 10.1016/j.ijporl.2003.07.012.

Поступила: 22.10.2025

Шарагин Павел Алексеевич – научный сотрудник лаборатории цифровых и вычислительных методов дозиметрии Южно-Уральского Федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 454014, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: sharagin@urcrm.ru

ORCID: 0000-0002-1457-4916

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, заведующая лабораторией цифровых и вычислительных методов дозиметрии, ведущий научный сотрудник Южно-Уральского Федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0002-4958-3214

Шишкина Елена Анатольевна – ведущий научный сотрудник, доктор биологических наук, директор Научно-исследовательского института радиологической защиты в составе Южно-Уральского Федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства; Доцент кафедры радиобиологии Челябинского государственного университета, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0003-4464-0889

Для цитирования: Шарагин П.А., Толстых Е.И., Шишкина Е.А. Оценка морфометрических характеристик гипофиза и окружающих его тканей для создания дозиметрической модели // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 83–93. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-83-93

The evaluation of morphometric characteristics of the pituitary gland and its adjacent tissues to elaborate a dosimetric model

Pavel A. Sharagin¹, Evgenia I. Tolstykh¹, Elena A. Shishkina^{1,2}

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

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

The pituitary gland exposure can lead to increase the risk of hormone-dependent cancers, such as breast cancer. The pituitary gland is located in the pituitary fossa of the sphenoid bone and can be exposed due to bone-seeking radionuclides such as ⁹⁰Sr. The Commission on Radiological Protection does not distinguish the pituitary gland as a separate organ for absorbed dose calculating from incorporated radionuclides. In this regard, an urgent task is to create a dosimetric model that simulates the geometry of the source-tissues – the bones of the skull, and the target-tissue – the pituitary gland and adjacent tissues. This model will allow us to calculate the dose factors converting the activityconcentration of radionuclide in the bone to the absorbed dose rate in the pituitary gland. To develop such a model, it is necessary to provide a systematic review of data on the size of the pituitary gland and surrounding tissues. Objective: to evaluate the morphometric characteristics necessary for constructing a computational dosimetric phantom of the pituitary gland and its adjacent tissues for people of the following age groups: newborn, 1-year-old, 5-year-old, 10-year-old, 15-year-old, adults. Materials and methods: The dosimetric model is supposed to include anatomical structures located within 1.5 cm around the pituitary gland. Therefore, the characteristics of the following tissues were evaluated based on published data: part of the brain, content of the sphenoid sinus, vessels around pituitary gland, pituitary gland, the sphenoid bone. Results and Discussion: The characteristics of the simulated objects were evaluated for all age groups, for the sella turcica they ranged from 3.4–13.3 mm, and for the pituitary gland – 3.8–13.6 mm. These values are based on studies of ~5,000 people. The size of the vascular sinuses is estimated at 1–1.7 mm, the thickness of the membranes of the pituitary gland is 0.57 mm. The thickness of the cortical bone was 0.75 mm, and the bone volume to total bone volume ratio was 39 %. Conclusion: The results of this work will be used for creating of three-dimensional computational dosimetric phantoms of the pituitary gland and its surrounding tissues for different age groups.

Key words: computational phantoms, internal dosimetry, pituitary gland, sella turcica.

Authors' personal contribution

Pavel A. Sharagin – data analysis, article writing.
Elena A. Shishkina – concept development, research design.

Evgenia I. Tolstykh – concept development, article editing.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Pavel A. Sharagin

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

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

Sources of funding

The work was funded within the framework of the research project: "Long-term effects of chronic radiation exposure of Ural region population".

References

1. Krestinina LYu, Mikryukova LD, Shalaginov SA, Silkin SS, Epifanova SB, Akleyev AV. Breast cancer incidence risk in accidentally exposed persons of the Southern Urals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 69-79. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-69-79.
2. Ajmal A, McKean E, Sullivan S, Barkan A. Decreased quality of life (QoL) in hypopituitary patients: involvement of glucocorticoid replacement and radiation therapy. *Pituitary*. 2018;21(6): 624-630.
3. Appelman-Dijkstra NM, Kokshoorn NE, Dekkers OM, Neelis KJ, Biermasz NR, Romijne JA, et al. Pituitary dysfunction in adult patients after cranial radiotherapy: systematic review and meta-analysis. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism*. 2011;96(8): 2330-2340.
4. Agha A, Sherlock M, Brennan S, O'Connor SA, O'Sullivan E, Rogers B, et al. Hypothalamic-pituitary dysfunction after irradiation of nonpituitary brain tumors in adults. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism*. 2005; 90(12): 6355-6360.
5. Lam KS, Tse VK, Wang C, Yeung RT, Ho JH. Effects of cranial irradiation on hypothalamic-pituitary function – a 5-year longitudinal study in patients with nasopharyngeal carcinoma. *Quarterly journal of medicine*. 1991;78(286): 165-176.
6. VanKoevering KK, Sabetsarvestani K, Sullivan SE, Barkan A, Mierzwa M, McKean EL. Pituitary dysfunction after radiation for anterior skull base malignancies: incidence and screening. *Journal of neurological surgery. Part B, Skull base*. 2020; 81(1): 75-81.
7. Contrera KJ, Phan J, Waguespack SG, Aldehaim M, Wang X, Lim TY, et al. Prevalence of pituitary hormone dysfunction following radiotherapy for sinonasal and nasopharyngeal malignancies. *Head & neck*. 2023;45(10): 2525-2532. DOI: 10.1002/hed.27476.
8. Schuler LA, O'Leary KA. Prolactin: The Third Hormone in Breast Cancer. *Frontiers in endocrinology*. 2022;13(9): 10978. DOI: 10.3389/fendo.2022.910978. PMID: 35784527; PMCID: PMC9244687.
9. Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Shishkina EA, Tolstykh EI, Akleev AV. Contemporary Understanding of Radioactive Contamination of the Techa River in 1949-1956. *Radiatsionnaya biologiya, radioecologiya = Radiation biology, radioecology*. 2016;56(5): 523-534.
10. ICRP. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67; 1993. *Annals of the ICRP*. 1993;23(3-4).
11. Pirinc B, Fazliogullari Z, Guler I, Unver Dogan N, Uysal II, Karabulut AK. Classification and volumetric study of the sphenoid sinus on MDCT images. *European archives of oto-rhino-laryngology: official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS): affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery*. 2019;276(10): 2887-2894. DOI: 10.1007/s00405-019-05549-8.
12. Dwairy AL, Mousaa S, Fataftah A, Tarifi J, Amjad A, Obai al-Ani S, et al. Morphometric analysis of the sella turcica and sphenoid sinus: a retrospective cross-sectional study. *International Journal of Morphology*. 2023; 41(3): 858-862.
13. Kayalioglu G, Erturk M, Varol T. Variations in sphenoid sinus anatomy with special emphasis on pneumatization and endoscopic anatomic distances. *Neurosciences (Riyadh, Saudi Arabia)*. 2005;10(1): 79-84.
14. Nagaraj T, Shruthi R, James L, Keerthi I, Balraj L, Goswami RD. The size and morphology of sella turcica: A lateral cephalometric study. *Journal of medicine, radiology, pathology and surgery*. 2015;1: 3-7.
15. Konwar SK, Singhla A, Bayan R. Morphological (Length, Depth, and Diameter) Study of Sella Turcica in Different Mandibular Growth Patterns in Indians. *International Journal of Dental and Medical Specialty*. 2016;3(3): 4-9.
16. AL-Mohana RAAM, Muhammed FK, Li X, Lubamba GP. The bridging and normal dimensions of sella turcica in Yemeni individuals. *Oral Radiology*. 2022; 38: 162-170. DOI: 10.1007/s11282-021-00541-7.
17. Hasan HA, Alam MK, Yusof A, Mizushima H, Kida A, Osuga N. Size and morphology of sella turcica in Malay populations: a 3D CT study. *Journal of Hard Tissue Biology*. 2016; 25: 313-320. DOI: 10.2485/jhtb.25.313
18. GetData GraphDrgitzer: Available from: <http://getdata-graph-digitizer.com> [Accessed June 01, 2025]
19. Covell WP. Growth of the human prenatal hypophysis and the hypophyseal fossa. *American Journal of Anatomy*. 1927;38: 379-422.
20. Axelsson S, Storhaug K, Kjaer I. Post-natal size and morphology of the sella turcica. Longitudinal cephalometric standards for Norwegians between 6 and 21 years of age. *European Journal of Orthodontics*. 2004;26(6): 597-604. DOI: 10.1093/ejo/26.6.597.
21. Abebe G, Gebremickael A, Mergu P, Manna S, Chisha Y, Manna S, et al. Morphometric Analysis of the Sella Turcica and its Variation with Sex and Age among Computed Tomography Scanned Individuals in Soddo Christian Hospital, Ethiopia. *International Journal of Anatomy Radiology and Surgery*. 2021;10 (2): 48-51.
22. Motwani MB, Biranjan R, Dhole A, Choudhary AB, Mohite A. A study to evaluate the shape and size of sella turcica and its correlation with the type of malocclusion on lateral cephalometric radiographs. *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences*. 2017;16: 126-132.
23. Muhammed FK, Abdullah AO, Liu Y. Morphology, Incidence of Bridging, Dimensions of Sella Turcica, and Cephalometric Standards in Three Different Racial Groups. *Journal of Craniofacial Surgery*. 2019;30(7): 2076-2081. DOI: 10.1097/SCS.00000000000005964.
24. Muhammed FK, Abdullah AO, Liu Y. A morphometric study of the sella turcica: race, age, and gender effect. *Folia morphologica*. 2020;79: 318-326.
25. Issrani R, Alanazi SH, Alrashed FF, Alrasheed SS, Bader AK, Prabhu N, et al. Radiographic Analysis of Morphological Variations of Sella Turcica in Different Skeletal Patterns Among Saudi Subpopulations. *International Journal of General Medicine*. 2023;16: 2481-2491. DOI: 10.2147/IJGM.S413903.
26. Usman Z, Zagga AD, Yunusa GH, Abubakar U, Bello A. Shapes and Sizes of Sella Turcica Using Computerized Tomography (CT) from Tertiary Hospital in Sokoto, Nigeria. *Asian Journal of Medicine and Health*. 2020;18(1): 8-15. Available from: <https://journalajmah.com/index.php/AJMAH/article/view/390> [Accessed June 01, 2025].
27. Islam M, Alam MK, Yusof A, Kato I, Honda Y, Kubo K, et al. 3D CT Study of Morphological Shape and Size of Sella Turcica in Bangladeshi Population. *Journal of Hard Tissue Biology*. 2017;26: 1-6.
28. Ibinaiye PO, Olarinoye-Akorede S, Kajogbola O, Bakari AG. Magnetic Resonance Imaging Determination of Normal Pituitary Gland Dimensions in Zaria, Northwest Nigerian Population. *Journal of Clinical Imaging Science*. 2015;5: 29. DOI: 10.4103/2156-7514.157853.
29. Önal V, Evren A, Chatzioglu GON, Tellioğlu AM. Anatomical features of sella turcica with comprehensive literature review. *Revista da Associação Medica Brasileira*. 2023; 69(8). DOI: 10.1590/1806-9282.20230402.
30. Jha A, Paudel N, Nepal S, Nayak R. Normal Pituitary Gland Size and Morphology and Its Variations Related to Age and Gender: An MRI Evaluation. *Journal of Nepalganj Medical College*. 2020;18(1): 36-39. DOI: 10.3126/jngmc.v18i1.35175.
31. Lamichhane TR, Pangeni S, Paudel S, Lamichhane HP. Age and gender related variations of pituitary gland size of healthy Nepalese people using magnetic resonance imaging. *American Journal of Biomedical Engineering*. 2015;5(4): 130-35.
32. Yadav P, Singhal S, Chauhan S, Harit S. MRI evaluation of size and shape of normal pituitary gland: Age and sex related

- changes. *Journal of Clinical and Diagnostic Research.* 2017;11(12) DOI: 10.7860/JCDR/2017/31034.10933.
33. Iskr T, Stachera B, Mozdzen' K, Murawska A, Ostrowsk P, Bonczar M, et al. Morphology of the Sella Turcica: A Meta-Analysis Based on the Results of 18,364 Patients. *Brain Science.* 2023;13(8): 1208. DOI: 10.3390/brainsci13081208.
34. Chen J, Pool C, Slonimsky E, King TS, Pradhan S, Wilson MN. Anatomical Parameters and Growth of the Pediatric Skull Base: Endonasal Access Implications. *Journal of Neurological Surgery Part B: Skull Base.* 2022;84(4): 336-348. DOI: 10.1055/a-1862-0321.
35. Silveira BT, Fernandes KS, Trivino T, Dos Santos LYF, de Freitas CF. Assessment of the relationship between size, shape and volume of the sella turcica in class II and III patients prior to orthognathic surgery. *Surgical and Radiologic Anatomy.* 2020;42(5): 577-582. DOI: 10.1007/s00276-019-02406-5.
36. BodyParts3D/Anatomography: Available from: <https://lifesciencedb.jp/bp3d/> [Accessed June 17, 2025].
37. Lang J, Issing P. Über Messungen am Clivus, den Foramina an der Basis cranii externa und den oberen Halswirbeln [The measurements of the clivus, the foramina on the external base of the skull and the superior vertebrae]. *Annals of Anatomy.* 1989;169(1): 7-34.
38. Pryor McIntosh L, Strait DS, Ledogar JA, Ross CF, Wang Q, Opperman LA, et al. Internal Bone Architecture in the Zygoma of Human and Pan. *The Anatomical Record.* 2016;299(12): 1704-1717. DOI: 10.1002/ar.23499.
39. González-García R, Monje F. Is micro-computed tomography reliable to determine the microstructure of the maxillary alveolar bone? *Clinical Oral Implants Research.* 2013;24(7): 730-737. DOI: 10.1111/j.1600-0501.2012.02478.x.
40. Sari S, Sari E, Akgun V, Ozcan E, Ince S, Saldir M, et al. Measures of pituitary gland and stalk: from neonate to adolescence. *Journal of Pediatric Endocrinology and Metabolism.* 2014;27(11-12): 1071-1076. DOI: 10.1515/jpem-2014-0054.
41. Argyropoulou M, Perignon F, Brunelle F, Brauner R, Rappaport R. Height of normal pituitary gland as a function of age evaluated by magnetic resonance imaging in children. *Pediatric Radiology.* 1991;21(4): 247-249. DOI: 10.1007/BF02018614.
42. Sahni D, Jit I, Harjeet, Neelam, Bhansali A. Weight and dimensions of the pituitary in northwestern Indians. *Pituitary.* 2006;9(1): 19-26. DOI: 10.1007/s11102-006-7503-5.
43. Ju KS, Bae HG, Park HK, Chang JC, Choi SK, Sim KB. Morphometric study of the korean adult pituitary glands and the diaphragma sellae. *Journal of Korean Neurosurgical Society.* 2010;47(1): 42-47. DOI: 10.3340/jkns.2010.47.1.42.
44. Bonczar M, Wysiadecki G, Ostrowski P, Michalczak M, Plutecki D, Wilk J, et al. The Morphology of the Pituitary Gland: A Meta-Analysis with Implications for Diagnostic Imaging. *Brain Science.* 2023;13(1): 89. DOI: 10.3390/brainsci13010089.
45. Kosty J, Peterson R, Miriyala S, Banks T, Kandregula S, Dossani R, et al. An Anatomic Assessment of the Intercavernous Sinuses and Review of the Literature. *Journal of Neurological Surgery Part B: Skull Base.* 2022;84(3): 266-271. DOI: 10.1055/a-1819-0144.
46. Songtao Q, Yuntao L, Jun P, Chuaping H, Xiaofeng S. Membranous layers of the pituitary gland: histological anatomic study and related clinical issues. *Neurosurgery.* 2009;64(3). DOI: 10.1227/01.NEU.0000327688.76833.F7.
47. Fujioka M, Young LW. The sphenoidal sinuses: radiographic patterns of normal development and abnormal findings in infants and children. *Radiology.* 1978;129(1): 133. DOI: 10.1148/129.1.133.
48. Tan HK, Ong YK, Teo MS, Fook-Chong SM. The development of sphenoid sinus in Asian children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology.* 2003;67(12): 1295-1302. DOI: 10.1016/j.ijporl.2003.07.012.

Received: October 22, 2025

For correspondence: Pavel A. Sharagin – Master of Biology, Researcher of the R&D Laboratory of Digital and Computational Dosimetry Methods, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency (68A, Vorovsky Str., Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: sharagin@urcrm.ru)

ORCID: 0000-0002-1457-4916

Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Sciences, Head of the R&D Laboratory of Digital and Computational Dosimetry Methods, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0002-4958-3214

Elena A. Shishkina – Doctor of Biological Sciences, Director at the Research Institute of Radiological Protection, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency; Associate Professor of the Department of Radiobiology of Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0003-4464-0889

For citation: Sharagin P.A., Tolstykh E.I., Shishkina E.A. The evaluation of morphometric characteristics of the pituitary gland and its adjacent tissues to elaborate a dosimetric model. *Radiatsionnaya Gygiene = Radiation Hygiene.* 2025. Vol. 18, No. 4. P. 83–93. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-83-93

Вопросы обеспечения соответствия испытательных лабораторий радиационного контроля критериям аккредитации

Кадука М.В., Бекяшева Т.А., Иванов С.А., Ступина В.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

Новая система аккредитации создала достаточно жесткие условия для лабораторий и привела к необходимости строго соблюдать ряд положений, обеспечивающих соответствие аккредитованных лиц критериям аккредитации. Испытательные лаборатории или испытательные лабораторные центры, осуществляющие радиационный контроль, проводят работы по испытаниям в целях обязательного подтверждения (оценки) соответствия. При этом аккредитация в национальной системе аккредитации – Росаккредитации является необходимым условием деятельности испытательных лабораторий, осуществляющих такие виды работ. В статье перечислены законы и подзаконные акты, регулирующие деятельность аккредитованных в национальной системе аккредитации лабораторий, приведены требования критерии аккредитации, относящиеся к лабораториям радиационного контроля и описаны оптимальные способы обеспечения соответствия лабораторий указанным требованиям. Перечислены документы, которые могут быть включены в систему менеджмента качества испытательной лаборатории. Описаны подходы к построению некоторых элементов системы менеджмента качества в свете требований новых документов Росаккредитации. Разъяснены аспекты особенностей риск-ориентированного подхода, необходимого к применению аккредитованными испытательными лабораториями в современных условиях. Приведены примеры элементов процедур наблюдения за персоналом и мониторинга компетентности персонала. Отмечено, что особое внимание в современных реалиях следует уделять повышению квалификации и компетентности персонала. В настоящее время существует немало обучающих платформ, которые проводят, в том числе, бесплатные вебинары, посвященные подходам к обеспечению соответствия испытательных лабораторий отдельным требованиям критерии аккредитации. На данных платформах можно узнать о внесении изменений в те или иные законы и подзаконные акты в сфере требований к аккредитованным лицам, получить ответы на вопросы, возникающие в процессе практической реализации испытательной лабораторией собственных подходов к построению системы менеджмента качества в целом и отдельных ее элементов, получить новые знания и компетенции.

Ключевые слова: испытательная лаборатория радиационного контроля, обязательная оценка соответствия, критерии аккредитации, система менеджмента качества, риск-ориентированный подход.

Введение

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 24.01.2011 N 86 «О единой национальной системе аккредитации»¹, Постановлением Правительства Российской Федерации от 17.10.2011 N 845 «О Федеральной службе по аккредитации»² функции национального органа Российской Федерации по аккредитации, по формированию единой национальной системы аккредитации и контролю за деятельностью аккредитованных лиц (АЛ) осуществляет Федеральная служба по аккредитации или Росаккредитация. Аккредитация испытательной лаборатории

является официальным признанием Федеральной службой по аккредитации технической компетентности лаборатории в заявленных областях деятельности.

Новая система аккредитации создала достаточно жесткие условия для лабораторий и привела к необходимости строго соблюдать ряд положений, обеспечивающих соответствие АЛ критериям аккредитации. Особенностью контрольной деятельности Федеральной службы по аккредитации является то, что в соответствии с частью 1 статьи 27 Федерального закона от 28 декабря 2013 г. N 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации»³ ведомство не проводит плановые проверки юридических

¹ Указ Президента Российской Федерации от 24.01.2011 N 86 (ред. от 28.10.2014) «О единой национальной системе аккредитации». [Decree of the President of the Russian Federation "On the Unified National accreditation system". (In Russ.)]

² Постановление Правительства Российской Федерации от 17.10.2011 N 845 (ред. от 30.05.2025) «О Федеральной службе по аккредитации» (вместе с "Положением о Федеральной службе по аккредитации"). [Decree of the Government of the Russian Federation No. 845 dated 17.10.2011 (as amended on 30.05.2025) "On the Federal Service for Accreditation" (together with "Regulations on the Federal Service for Accreditation"). (In Russ.)]

Кадука Марина Валерьевна

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

лиц и индивидуальных предпринимателей. Внеплановые проверки проводятся: в целях оценки устранения несоответствий критериям аккредитации, выявленных в ходе процедуры подтверждения компетентности; во исполнение поручения Правительства Российской Федерации; на основании обращений о возможном нарушении аккредитованными лицами законодательства об аккредитации; на основании индикаторов риска нарушений обязательных требований; в рамках оценки выполнения ранее выданных предписаний. Результатом таких проверок может стать приостановление действия аккредитации АЛ, вынесение судебных актов о привлечении к административной ответственности. Чтобы избежать таких печальных последствий, следует приложить значительные усилия и затратить большое количество времени. Основными причинами приостановления деятельности АЛ в результате внеплановых проверок являются невыполнение выданных предписаний, неустранение выявленных при проверке компетентности АЛ несоответствий.

Следует принимать во внимание, что в соответствии с пунктом 12 Статьи 1 Федерального закона от 29.07.2018 N 262-ФЗ⁴ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования порядка аккредитации» статья 19 Федерального закона «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» от 28.12.2013 N 412-ФЗ, включавшая требования к содержанию и сроку действия аттестата аккредитации, утратила силу. Соответственно, с 30.07.2018 г. аттестаты аккредитации и дубликаты к ним на бумажном носителе Росаккредитация не выдает. При необходимости аккредитованные лица самостоятельно получают выписку из реестра аккредитованных лиц через личный кабинет АЛ в Федеральной государственной информационной системе Росаккредитации (ФГИС), данная выписка удостоверяет аккредитацию в определенной области аккредитации на дату формирования выписки.

Испытательные лаборатории или испытательные лабораторные центры (далее – ИЛ), осуществляющие радиационный контроль, проводят работы по испытаниям в целях обязательного подтверждения (оценки) соответствия. При этом аккредитация в национальной системе аккредитации

– Росаккредитации является необходимым условием деятельности ИЛ, осуществляющих такие виды работ. Данное требование определено статьей 31 Федерального закона «О техническом регулировании» от 27.12.2002 N 184-ФЗ⁵, пунктом 1 статьи 42 Федерального закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 N 52-ФЗ⁶, Санитарными правилами и нормативами, применяемыми в сфере радиационного контроля. Законодательство Российской Федерации об аккредитации в национальной системе аккредитации состоит из Федерального закона «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» (в действующей редакции), других федеральных законов и принимаемых в соответствии с ними иных нормативных правовых актов Российской Федерации, в том числе Приказов Минэкономразвития, Постановлений Правительства Российской Федерации, ГОСТ, Политик Рекомендаций, ИЛАК и так далее.

Цель исследования – обозначить законодательные, правовые, нормативные и иные документы применительно к работе ИЛ в области распространения требований к аккредитованным лицам, осуществляющим деятельность по обязательной оценке соответствия. Разъяснить положения некоторых разделов документов в поле действия аккредитации, применяемых в ежедневной работе ИЛ. Дать рекомендации по построению документов системы менеджмента (качества) ИЛ.

Критерии аккредитации, относящиеся к деятельности испытательных лабораторий радиационного контроля

Критерии аккредитации лиц, аккредитованных в национальной системе аккредитации (далее – КА) изложены в Приказе Минэкономразвития Российской Федерации от 26.10.2022 N 707⁷. К ИЛ относятся критерии 21–27 (КА 22 утратил силу с 1 сентября 2023 года), при этом ряд критериев (24.7, 24.8, 25) относятся не ко всем ИЛ, а только к лабораториям, осуществляющим деятельность в сферах, сопряженных с риском причинения вреда ввиду ненадлежащего исполнения работ – средства связи, железнодорожная продукция, взрывоопасные среды, единичные транспортные средства.

Согласно КА 21 ИЛ должна соответствовать требованиям, установленным положениями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»⁸ (далее – ГОСТ 17025).

³Федеральный закон от 28.12.2013 N 412-ФЗ (ред. от 24.07.2023) «Об аккредитации в национальной системе аккредитации». [Federal State Law N 412-FZ, 28.12.2013 “On the Accreditation in national system of accreditation”. (In Russ.)]

⁴Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования порядка аккредитации» от 29.07.2018 N 262-ФЗ (в ред. Федерального закона от 11.06.2021 N 176-ФЗ). [Federal State Law N 262-FZ, 29.07.2018 “On Amendments to the Federal Law “On Accreditation in the National Accreditation System” and Certain Legislative Acts of the Russian Federation Regarding the Improvement of the Accreditation Procedure”. (In Russ.)]

⁵Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 N 184-ФЗ. [Federal State Law N 184-FZ, 27.12.2002 “On Amendments to the Federal Law “On technical regulation”. (In Russ.)]

⁶Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 N 52-ФЗ. [Federal State Law N 52-FZ, 30.03.1999 “On the sanitary and epidemiological well-being of the population”. (In Russ.)]

⁷Приказ Минэкономразвития России от 26.10.2020 N 707 (ред. от 14.05.2025) «Об утверждении критерии аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации» (Зарегистрировано в Минюсте России 16.11.2020 N 60907). [Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation N 707, 26.10.2020 “On Approval of Accreditation Criteria and the List of Documents Confirming the Applicant’s and Accredited Person’s Compliance with Accreditation Criteria”. (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 16.11.2020 N 60907). (In Russ.)]

⁸ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. «Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» (введен в действие Приказом Росстандарта от 15.07.2019 N 385-ст) [ISO/IEC 17025-2019 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories” (introduced by Order of Rosstandart, 15.07.2019 N 385-st) (In Russ.)]

В документах системы менеджмента (качества) следует привести сведения о том, каким образом ИЛ практически обеспечивает соответствие своей деятельности требованиям, заложенным в каждом разделе, подразделе, пункте и подпункте (включая обозначенные буквенными символами) ГОСТ 17025. В случае неприменимости к деятельности ИЛ того или иного пункта (подпункта) ГОСТ 17025 следует указать на это в документах системы менеджмента ИЛ, в том числе, в Руководстве по качеству (далее – РК) и аргументированно обосновать неприменимость.

В действующей редакции ГОСТ 17025 использован термин «система менеджмента» (далее – СМ), вместо термина «система менеджмента качества» (далее – СМК), принятого во всех предыдущих версиях стандарта. При этом следует принимать во внимание, что система менеджмента качества (СМК) – это часть системы менеджмента применительно к качеству. Несмотря на существенные отличия в контекстах различных организаций и наличие особенностей их функционирования, что неизбежно отражается на общем менеджменте, требования к СМК практически всегда носили достаточно унифицированный характер, что и было закреплено в стандартах ISO 9000 сначала в 1985–1987 гг., а позднее и в некоторых других направлениях, ориентированных на методологию построения таких систем менеджмента [1]. По большому счету, вся система менеджмента ИЛ сфокусирована именно на качество применительно ко всем процессам ИЛ, включая как непосредственно лабораторную деятельность, так и все остальные виды деятельности лаборатории. Поэтому в современных реалиях ИЛ вольна сама определить для себя какой термин СМ или СМК она будет использовать в своих документах.

В КА 23 перечислены документы по стандартизации, требования которых должна выполнять ИЛ: Р 50.1.108-2016 «Политика ИЛАК по прослеживаемости результатов измерений»⁹, Р 50.1.109-2016 «Политика ИЛАК в отношении неопределенности при калибровках»¹⁰, ГОСТ Р 58973-2020 «Правила к оформлению протоколов испытаний»¹¹, Р 1323565.1.038-2021 «Оценка соответствия. Политика ILAC в отношении участия в деятельности по проверке квалификации»¹².

Первые два документа опосредованно относятся к деятельности ИЛ и выполнение их требований обеспечивается использованием при испытаниях оборудования утвержденного типа, внесенного в Государственный реестр средств измерений, прошедшего поверку в аккредитованном на это учреждении, на что удобнее всего указать в подразделе РК «Метрологическая прослеживаемость и неопределенность» раздела «Оборудование». Исследования должны выполняться с использованием оборудования, имеющего технические характеристики, обеспечивающие требуемую точность и необходимую неопределенность при проведении исследований.

⁹Р 50.1.108-2016 «Политика ИЛАК по прослеживаемости результатов измерений» (введен в действие Приказом Росстандарта от 12.10.2016 N 1387-ст) [“ILAC policy on the traceability of measurement results” (introduced by Order of Rosstandart, 12.10.2016 N 1387-st). (In Russ.)]

¹⁰Р 50.1.109-2016 «Политика ИЛАК в отношении неопределенности при калибровках» (введен в действие Приказом Росстандарта от 12.10.2016 N 1388-ст) [“ILAC policy for uncertainty in calibration” (introduced by Order of Rosstandart, 12.10.2016 N 1388-st). (In Russ.)]

¹¹ГОСТ Р 58973-2020. Оценка соответствия. «Правила к оформлению протоколов испытаний». (введен в действие Приказом Росстандарта от 27.08.2020 N 563-ст) [GOST R 58973-2020 “Conformity assessment. Rules for registration of test reports” (introduced by Order of Rosstandart, 27.08.2020 N 563-st). (In Russ.)]

¹²Р 1323565.1.038-2021. Рекомендации по стандартизации. Оценка соответствия. Политика ILAC в отношении участия в деятельности по проверке квалификации” (утв. и введены в действие Приказом Росстандарта от 03.11.2021 N 1429-ст) [“ILAC Policy for Participation in Proficiency Testing Activities” (introduced by Order of Rosstandart, 03.11.2021 N 1429-st). (In Russ.)]

Описать выполнение ИЛ требований ГОСТ Р 58973-2020 можно в разделе РК «Представление отчетов о результатах», логично поочередно приводя сведения о выполнении ИЛ требований к отчетам по испытаниям ГОСТ 17025 и требования к протоколам испытаний ГОСТ Р 58973-2020. В части соблюдения требований ГОСТ Р 58973-2020 следует обратить внимание на то, что согласно п. 5.3 данного документа, не допускается проставление номера листа на первом листе протокола испытаний. Для оформления протокола испытаний рекомендуется использовать размеры шрифтов 10, 12, 13, 14. При формировании таблиц допускается использовать шрифты меньших размеров. Многострочные реквизиты печатают через один межстрочный интервал, составные части реквизитов отделяют дополнительным интервалом. Протокол должен содержать сведения о наименовании структурного подразделения ИЛ, в котором проводились испытания, фактическом адресе места осуществления деятельности, номере телефона, адресе электронной почты, уникальном номере записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц. В документах СМК стоит определить порядок формирования номера протокола испытаний. Пункт 5.12 ГОСТ Р 58973-2020 содержит указание на то, что дата протокола испытаний должна соответствовать дате утверждения документа. В то же время пункт 7.8.2.1 j) ГОСТ 17025 требует, чтобы отчет по испытаниям содержал дату «выдачи» отчета. Однако в оригинальной версии ГОСТ 17025 данный пункт изложен в следующей редакции «the date of issue of the report», что дает основание датой выдачи считать дату выпуска, соответственно, дату утверждения протокола. Следует обратить внимание на требование пункта 5.22 ГОСТ Р 58973-2020: протокол испытаний заверяют печатью организации, печать проставляют, не захватывая собственно-ручной подписи лица, утвердившего документ.

Р 1323565.1.038-2021 «Оценка соответствия. Политика ILAC в отношении участия в деятельности по проверке квалификации» больше касается экспертной группы, проводящей проверку компетентности, однако в РК полезно указать как ИЛ соответствует данному документу, например, участвуя в межлабораторных сличительных испытаниях, отличных от проверок квалификации.

КА 24 содержит дополнительные требования к ИЛ, выполняющим работы по исследованиям (испытаниям) и измерениям в целях обязательного подтверждения (оценки) соответствия, что непосредственно относится к лабораториям, осуществляющим радиационный контроль. Следует обратить внимание на то, что специалисты ИЛ, выполняющие работы по испытаниям в целях обязательного подтверждения соответствия в области аккредитации (ОА), должны иметь высшее образование, либо среднее профессиональное образование или дополнительное профессиональное

образование по профилю, соответствующему ОА, либо учennуу степень по специальности и (или) направлению подготовки, соответствующему области аккредитации. Специалисты с медицинским образованием не могут проводить самостоятельные испытания, если у них нет профессиональной переподготовки по радиационной безопасности и радиационному контролю. Согласно Приказу Минобрнауки Российской Федерации от 24 марта 2025 г. N 266 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам»¹³, срок освоения программ профессиональной переподготовки не может быть менее 250 часов.

Специалисты ИЛ, выполняющие работы по испытаниям в целях обязательного подтверждения (оценки) соответствия, должны иметь опыт работы по исследованиям (испытаниям), измерениям в ОА не менее двух лет. Следует учитывать, что работники, не имеющие двухлетнего опыта по исследованиям в ОА, могут принимать участие в таких исследованиях, но только под контролем наставника в рамках прохождения стажировок, документально оформленной по правилам СМК ИЛ. Такие работники могут выполнять самостоятельные записи в рабочих журналах, но при условии дополнительного визирования и датирования таких записей наставниками, и не имеют права подписания протоколов испытаний.

Работниками ИЛ, непосредственно выполняющими работы по испытаниям в ОА, состоящими в штате по основному месту работы, должно обеспечиваться проведение испытаний по не менее чем половине включенных в ОА стандартов (методов) испытаний. Специалисты таких ИЛ могут работать в составе только одной лаборатории. Руководитель ИЛ, его заместители должны работать в лаборатории в штате по основному месту работы.

Наличие у работников, участвующих в выполнении работ по испытаниям, навыков и профессиональных знаний, необходимых для выполнения работ по испытаниям в ОА, может быть подтверждено трудовым стажем, листами аттестации, документами по пройденным стажировкам, документами по мониторингу компетенции, повышением квалификации, сертификатами экспертов.

Наличие по месту (местам) осуществления деятельности в ОА ИЛ, в том числе по месту осуществления временных работ, на праве собственности или на ином законном основании, предусматривающем право владения и пользования, помещений, испытательного и вспомогательного оборудования, средств измерений и стандартных образцов может быть подтверждено УПД, ТН, счет-фактурами, свидетельствами о регистрации права на данные ресурсы. При этом следует учитывать, что требования 707 Приказа Минэкономразвития, в том числе по документам, подтверждающим наличие у ИЛ технических ресурсов, вступили в силу 01.01.2021 г., а срок хранения бухгалтерских документов составляет 5 лет с даты постановки на бухгалтерский учет согласно положениям 402-ФЗ от 06.12.2011 г. «О бухгалтер-

ском учете»¹⁴. Принимая во внимание определенные законодательством сроки хранения бухгалтерских документов для подтверждения права пользования оборудованием, приобретенным ранее 01.01.2016 г., достаточно предоставить финансовые ведомости организации. Право пользования зданием (помещением) может быть подтверждено свидетельством о регистрации права, выпиской ЕГРЮЛ, договором аренды.

Все помещения ИЛ, за исключением помещений для хранения проб для повторных испытаний, должны обязательно иметь документы о специальной оценке условий труда (СОУТ). Должны быть определены параметры, подлежащие периодическому или непрерывному контролю для каждого помещения ИЛ, например, параметры среды обитания, гамма-фон. В лабораторных помещениях, где осуществляется измерение индивидуальных эквивалентов дозы с использованием термолюминесцентных дозиметров в рамках проведения индивидуального дозиметрического контроля (ИДК), контролировать освещенность обязательно не для всех типов детекторов. Например, детекторы ДТГ-4 (а это подавляющее большинство используемых в Российской Федерации детекторов) не чувствительны к влиянию естественного и искусственного света – есть разъясняющее письмо производителя оборудования. При использовании данного типа детекторов приобретение люксметров не требуется. При этом следует обращать внимание на температуру и влажность в данных помещениях, так как в паспортах на дозиметрические термолюминесцентные установки указаны достаточно узкие допустимые диапазоны указанных параметров. ИЛ должна располагать фондом нормативных правовых актов, документов по стандартизации, правил и методов исследований (испытаний) и измерений, в том числе правил отбора образцов (проб), и иных документов, указанных в ОА, а также соблюдать требования данных документов. ИЛ должна разработать и соблюдать систему управления документацией, включающей, в том числе правила резервного копирования и восстановления документов, систему хранения и архивирования документов, правила систематизации и ведения архива. В помещениях архива должны ежедневно контролироваться параметры среды обитания. Должен быть определен специалист, ответственный за ведение архива – ключ от архива может находиться только у него. У ИЛ может быть несколько архивов, ответственным за ведение архивов может быть как один специалист, так и несколько специалистов, например, отдельный специалист для каждого из архивов ИЛ. В любом случае порядок ведения архива, правила архивирования, правила доступа к архивным документам и фиксации фактов пользования архивными документами, должны быть зафиксированы в документах СМК лаборатории. Архив может быть в отдельном кабинете или в шкафу в кабинете ИЛ, защищенном от постороннего доступа. Удобно иметь каталог архивных документов. Срок хранения документов в архиве составляет не менее трех лет с даты помещения документа в архив.

¹³Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.03.2025 N 266 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам» (Зарегистрировано в Минюсте России 22.04.2025 N 81928). [Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation N 266, 24.03.2025 "On Approval of the Procedure for Organizing and Carrying Out Educational Activities in Additional Professional Programs". (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 22.04.2025 N 81928). (In Russ.)]

¹⁴Федеральный закон «О бухгалтерском учете» от 06.12.2011 N 402-ФЗ. [Federal State Law N 402-FZ, 06.12.2011 "On accounting". (In Russ.)]

Подходы к построению некоторых элементов СМК ИЛ в свете новых положений, заложенных в ГОСТ 17025

Перечень документов СМК может включать в себя, но не ограничиваться: РК, Порядки, Системы, Документированные процедуры, Стандартные операционные процедуры, Матрицы, Перечни и так далее. Документы могут быть одного уровня (статуса), могут быть определены уровни иерархии документов. Руководство по качеству может состоять как из одного, так и из нескольких томов. При этом следует учитывать, что все документы, которыми пользуется и руководствуется в своей деятельности ИЛ, должны быть включены в ее СМК.

РК удобнее всего выстраивать в соответствии и в порядке разделов ГОСТ 17025, описывая в нем собственные процессы по каждому подразделу, пункту и подпункту данного документа и приводя в соответствующих разделах сведения, подтверждающие соблюдения КА. Выстраивая РК и, соответственно, процессы ИЛ, следует принимать во внимание разъяснение терминов, изложенное во введении к ГОСТ 17025, а именно: «должен» — обозначает требование; «следует» — обозначает рекомендацию; «может» — обозначает разрешение; «способен» — обозначает возможность. Более подробную информацию можно найти в документах, перечисленных во введении и справочных разделах ГОСТ 17025.

Начиная с 2015 года, стандарты ISO на системы менеджмента включают концепцию риск-ориентированного мышления (risk-based thinking). Присутствует она и в ГОСТ 17025. В редакции 2005 года стандарт ISO/IEC 17025 практически не содержал информации о рисках. Однако он включал раздел 4.12, который определял требования к предупреждающим действиям. В новой редакции от термина «предупреждающие действия» отказались. Его место заняли оценка рисков и принятие соответствующих мер по их обработке. Следует еще раз подчеркнуть, что ГОСТ 17025, как и другие стандарты на системы менеджмента, устанавливает требования организационного, а не технического характера. Как показывает практика, лаборатории сталкиваются с определенными трудностями при выявлении рисков и разработке мер по их управлению. Наиболее распространенным методом оценки рисков можно считать расчет величины риска как произведения вероятности того или иного события на степень его негативного влияния на деятельность ИЛ. Если применяется именно такой метод, то меры управления риском должны снижать либо вероятность события, либо степень его негативного воздействия, или и то, и другое одновременно [2, 3].

Из основных новых акцентов действующей редакции ГОСТ 17025 следует выделить: четкое указание на необходимость применять риск-ориентированный подход, указание на то, что лаборатория должна рассматривать риски и возможности, связанные с лабораторной деятельностью, указание на то, что лаборатория должна идентифицировать и выбрать возможности для улучшений, а также принять необходимые действия. Среди особенностей новой версии – более широкая трактовка понятия компетентности. Оно включает в себя вопросы обеспечения беспристрастно-

сти и конфиденциальности. ISO считает их настолько важными с точки зрения обеспечения доверия к результатам деятельности лабораторий, что выделило соответствующие требования в отдельные разделы – 4.1 и 4.2. Более того, ГОСТ 17025 требует оценивать риски, связанные с нарушением беспристрастности, и в случае выявления таковых предпринимать меры по их снижению или исключению [2, 4].

Опыт общения с коллегами и опыт общения с экспертными группами (ЭГ) в процессе прохождения процедуры подтверждения компетентности показал, что как ИЛ, так и ЭГ зачастую придерживаются широко распространенного неким неизвестным автором тезиса «Возможности – это риски с положительным исходом». Такой подход является некорректным с точки зрения положений, заложенных в ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»¹⁵. Риск, как и возможность, неразрывно связан с целью и возникает только тогда, когда определена некая цель. Риск – это то, что мешает нам достичь поставленную цель. Возможность – это то, что помогает нам достичь поставленную цель. То есть риск, по сути, всегда несет негатив. Довольно странным с точки зрения логики звучало бы высказывание: «У ИЛ идентифицирован риск расширить сферу деятельности по испытаниям». Атрибутами риска являются: вероятность реализации; негативные последствия [5]. Если исчезает цель, то исчезает и связанный с ней риск, как и связанные с ней возможности [6]. Скорее всего именно поэтому соответствующий раздел ГОСТ 17025 называется «Действия, связанные с рисками и возможностями» (8.5), а действия, связанные с улучшениями, вынесены в отдельный раздел «Улучшения» (8.6). Мониторинг рисков и возможностей должен осуществляться ежегодно с целью идентификации всех произошедших изменений и оценки рисков и возможностей, связанных с новыми целями ИЛ. Это позволит выявить новые риски, использовать недоступные ранее возможности, разработать новые мероприятия, оптимизировать существующие виды деятельности [7].

ГОСТ 17025 не указывает ИЛ как именно она должна управлять рисками. Систему управления рисками выстраивает сама ИЛ приемлемым для нее способом и закрепляет ее в своей СМК [2, 5, 9]. Очень полезными в ГОСТ 17025 являются Примечания, которые приводятся во многих разделах и подразделах документа. При составлении своих документов СМК и выстраивании системы стоит ознакомиться с такими примечаниями. Так, в примечании к тезису о необходимости оценивать результативность действий, связанных с рисками и возможностями, в пункте 8.5.2 ГОСТ 17025 отмечено: «Хотя в настоящем стандарте указывается, что лаборатория планирует действия по устранению рисков, требования к формальным методам управления рисками или документированному процессу управления рисками не установлены. Лаборатории могут решить, следует ли разрабатывать более обширную методологию управления рисками, чем это требуется в настоящем стандарте, например, посредством применения других руководств или стандартов... Примерами действий, связанных с рисками, могут быть идентификация и предупреждение угроз, принятие рисков с целью реализации возможности, устранение ис-

¹⁵ ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство». (введен в действие Приказом Росстандарта от 10.12.2019 N 1379-ст) [GOST R ISO 31000-2019 "Risk management. Principles and guidelines" (introduced by Order of Rosstandart, 10.12.2019 N 1379-st). (In Russ.)]

точника риска, изменение вероятности риска или его последствий, разделение рисков или сохранение риска посредством обоснованного решения». Одним из способов управления рисками в ИЛ является составление реестра рисков с их ранжированием в зависимости от вероятности реализации и степени тяжести последствий [2, 5, 8]. В реестре фиксируются все идентифицированные риски и, видимо, такой способ управления рисками является оптимальным.

Как показала практика, управление рисками с оформлением паспорта на каждый идентифицированный в ИЛ риск, не является удобным способом работы с рисками. Составление паспорта риска в форме документа, содержащего всю информацию о риске, часто избыточную (например: вероятность, последствия, материальность, пороговый уровень принятия решения, индикатор, координатор, владелец) с последующим сведением всех идентифицированных рисков в единый документ (карту рисков, матрицу рисков и т.д.) вряд ли можно считать удобным и эффективным инструментом работы с рисками. Такой подход не только является избыточным, но и с большой вероятностью способным нанести прямой ущерб ИЛ, отнимая временной и физический ресурс специалистов и неся в связи с этим определенные риски возникновения несоответствующих работ. Можно сформулировать вышеизложенное следующим образом: «У ИЛ есть риск увлечься рисками при достижении поставленной цели их идентификации и минимизации вероятности реализации».

Опираясь на собственный опыт, можно утверждать, что удобнее всего работать с рисками через составление Плана мероприятий, предупреждающих реализацию рисков (аналогичен Плану предупреждающих мероприятий в предыдущей версии ГОСТ 17025). При этом нужно учитывать, что такие мероприятия (как и любые другие, за исключением отказа от конкретной цели) не исключают возможность реализации того или иного риска, но минимизируют ее.

При построении СМК у ИЛ часто возникают вопросы о том, как обеспечить соответствие лаборатории требованиям пункта 6.2 ГОСТ 17025 «Персонал», в частности подпункта 6.2.: «Лаборатория должна иметь процедуру (ы) и вести записи по ... 6.2.5 d) наблюдению за персоналом и подпункта 6.2.5 f) мониторингу компетентности персонала». ГОСТ 17025 не дает разъяснений о том, что подразумевается под упомянутыми процессами, не предлагает путей реализации их в ИЛ, но и не ограничивает ИЛ в выборе своей трактовки и своих способов обеспечения соответствия лабораторииенным требованиям. В любом случае в ИЛ должны быть разработаны процедуры (как бы они не назывались) по наблюдению за персоналом и мониторингу компетентности персонала, вестись датированные записи по выполнению мероприятий таких процедур и эффективности проведенных мероприятий, а также по принятию дальнейших решений, основанных на выводах о степени эффективности приведенной работы.

Удобным является составление отдельных годовых планов для мониторинга компетентности персонала и для наблюдения за персоналом, причем с возможностью их оперативной корректировки по результатам данных процессов. Мониторинг компетентности персонала может рассматриваться как процесс, сфокусированный на отдельных элементах, составляющих понятие «компетентность», напри-

мер: мониторинг соблюдения требований методик испытаний; достаточности квалификации; потребности в повышении квалификации (анкетирование); компетентности в вопросах СМК ИЛ (выборочные опросы); общий мониторинг компетентности путем аудита; мониторинг компетентности путем процедуры аттестации, иные виды мониторинга.

Наблюдение за персоналом может рассматриваться как процесс над процессами. При этом осуществляется наблюдение за всеми рутинными процессами жизненного цикла ИЛ и фиксирование результатов данного наблюдения, в том числе отклонений от нормального течения процессов, положительных и отрицательных проявлений в разных аспектах деятельности всей ИЛ и отдельных специалистов лаборатории. Проводится фиксирование ситуаций, провоцирующих реализацию уже идентифицированных или вновь выявленных в процессе наблюдения рисков. Наблюдение за персоналом может включать следующие элементы: проверка рабочих записей; выборочная проверка выполнения испытаний; выборочная проверка соблюдения требований СМК (устный контроль); проверка эффективности использования рабочего времени; наблюдение за рабочей атмосферой в коллективе лаборатории; проверка состояния рабочих мест специалистов; иные виды наблюдений.

В ИЛ должны быть назначены специалисты, ответственные за наблюдение и мониторинг, определена периодичность выполнения элементов данных процессов. Должны делаться выводы о необходимости дополнительных видов наблюдений, отметки о необходимости корректировки периодичности наблюдений и мониторинга или необходимости корректирующих действий.

Заключение

Необходимость уделения повышенного внимания к вопросам компетентности персонала, наделения персонала полномочиями на выполнение тех или иных процессов, мониторинга компетентности персонала и наблюдения за персоналом – ключевые новые подходы, четко обозначенные в действующей версии ГОСТ 17025. В документе делается акцент на риск-ориентированный подход к организации всей деятельности ИЛ, на необходимость идентификации возможностей ИЛ и путей их реализации, на критические подходы к оценке деятельности ИЛ, направленные на поиски возможности улучшений. Порядок осуществления всех процессов жизненного цикла ИЛ следует разумно подробно описать в документах СМК. Для удобства самой ИЛ полезно составить номенклатуру дел с обязательным включением ее в СМК, например, оформив в виде приложения к РК. Правильно составленное РК дает возможность оптимизировать процесс прохождения любых видов контроля, проверок и оценок. Проще все нюансы по осуществлению деятельности, бумагообороту, о том – какие документы хранятся в ИЛ, а какие в отделе кадров или другом подразделении организации, какой специалист какие документы подписывает и утверждает и т.д. тщательно и подробно задокументировать в РК, чем потом вносить в него изменения и осуществлять корректирующие мероприятия.

Особое внимание следует уделять повышению квалификации и компетентности персонала. В настоящее время существует немало обучающих платформ, которые проводят, в том числе, бесплатные вебинары, посвященные подходам к обеспечению соответствия ИЛ отдельным требованиям КА

и ГОСТ 17025. На данных платформах можно узнать о внесении изменений в те или иные законы и подзаконные акты в сфере требований к АЛ, получить ответы на вопросы, возникающие в процессе практической реализации ИЛ собственных подходов к построению СМК в целом и отдельных ее элементов, получить новые знания и компетенции. В ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева разработан новый цикл повышения квалификации по дополнительной профессиональной программе повышения квалификации «Обеспечение соответствия Испытательной лаборатории критериям аккредитации» (72 академических часа). Освоение основ данного цикла и практическое применение полученных знаний позволит специалистам лабораторий радиационного контроля минимизировать выявления потенциальных несоответствий лабораторий при прохождении процедуры подтверждения компетентности.

В данной публикации освещены лишь некоторые вопросы обеспечения ИЛ требованиям КА. Отдельного подробного описания требуют подходы к таким аспектам деятельности ИЛ, как мониторинг достоверности результатов, получение обратной связи от Заказчиков и от персонала, организация работы с поставщиками, вопросы обеспечения беспристрастности и конфиденциальности, обеспечение соответствия ресурсов ИЛ установленным требованиям, вопросы валидации и верификации методик и оборудования и другие вопросы. Более подробное освещение перечисленных, а также других аспектов деятельности ИЛ может быть дано в серии последующих публикаций.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кадука М.В. – научное руководство исследованием, определение цели, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, обработка и анализ полученных результатов, написание текста.

Бекяшева Т.А. – поиск и анализ литературы, анализ и интерпретация результатов, редактирование текста статьи.

Иванов С.А. – поиск и анализ литературы, анализ и интерпретация результатов, перевод.

Ступина В.В. – разработка дизайна исследования, редактирование текста статьи.

Кадука Марина Валерьевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая радиохимической лабораторией Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Адрес для переписки: 197101, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: kaduka@mail.ru

ORCID: 0009-0009-6970-4536

Бекяшева Тамара Анатольевна – ведущий инженер-исследователь радиохимической лаборатории 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: 0009-0008-6047-4116

Иванов Сергей Анатольевич – младший научный сотрудник радиохимической лаборатории 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: 0000-0003-4955-5261

Ступина Вероника Вячеславовна – ведущий инженер-исследователь радиохимической лаборатории 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: 0009-0002-7365-8519

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Скрипко Л.Е. Становление взглядов на менеджмент качества // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2022. Т. 21, № 3. С. 395–428. DOI: 10.21638/11701/spbu08.2022.304.
2. ИСО/МЭК 17025/2017: что ГОСТ грядущий нам готовит. Автор: Андрей Горбунов. URL: <https://kachestvo.pro/kachestvo-produktovii/ispytaniya-i-izmereniya/iso-mek-17025-2017-chto-gost-gryadushchiy-nam-gotovit/> (Дата обращения: 15.10.2025).
3. Борзов В.И. Применение менеджмента риска для реализации риск-ориентированного мышления в системе менеджмента качества // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 7-10. DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-7-10. 8.
4. Жемчугов А.М., Жемчугов М.К. Менеджмент XXI в. Ретроспектива и перспектива (часть 2) // Менеджмент сегодня. 2024. № 4. С. 262-277 URL: <https://grebennikon.ru/article-4emb.html>. (Дата обращения: 15.10.2025).
5. Горбунов А.В. Управление рисками в стандарте ISO 9001:2015 // Менеджмент качества. 2018. № 4. С. 262–271. URL: <https://grebennikon.ru/article-3dvh.html>. (Дата обращения: 15.10.2025).
6. Картвелишвили В.М. Свиридова О.А. Риск-менеджмент. Методы оценки риска. Москва: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2017. 120 с.
7. Романычева К.С., Спиридовон Д.М. Типовые риски и возможности процесса поверки средств измерений. Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации.» Екатеринбург. 18-22 мая 2020. С. 260- 267.
8. Бадалова А.Г., Тохунц Н.Б. Регламентация процессов управления рисками в современном риск-менеджменте // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. № 1 (56). С. 118-124.
9. Любимова Т.А. Система внутреннего контроля и управления рисками: на пути к зрелости // Менеджмент качества. 2018. № 4. С. 254–260. URL: <https://grebennikon.ru/article-q4ol.html> (Дата обращения: 15.10.2025).

Поступила: 20.10.2025

Для цитирования: Кадука М.В., Бекяшева Т.А., Иванов С.А., Ступина В.В. Вопросы обеспечения соответствия испытательных лабораторий радиационного контроля критериям аккредитации // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 94–102. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-94-102

Issues of the ensuring of radiation control testing laboratories correspondence to accreditation criteria

Marina V. Kaduka, Tamara A. Bekyasheva, Sergey A. Ivanov, Veronika V. Stupina

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 new accreditation system has created rather stringent conditions for laboratories and necessitated strict adherence to a number of provisions to ensure accredited entities meet accreditation criteria. Testing laboratories or testing laboratory centers that perform radiation control conduct testing for the mandatory confirmation (assessment) of compliance. Accreditation in the national accreditation system, Rosaccreditation, is a prerequisite for the operation of testing laboratories performing such work. This article lists the laws and regulations governing the activities of laboratories accredited in the national accreditation system, presents the accreditation criteria requirements applicable to radiation control laboratories, and describes optimal methods for ensuring laboratories meet these requirements. It also lists documents that can be included in a testing laboratory's quality management system. Approaches to developing certain elements of a quality management system in light of the requirements of new Rosaccreditation documents are described. Aspects of the risk-based approach required for accredited testing laboratories in today's environment are explained. Examples of personnel supervision and competency monitoring procedures are provided. It was noted that in today's environment, special attention should be paid to improving the qualifications and competence of personnel. Currently, numerous training platforms exist, including free webinars, dedicated to approaches to ensuring testing laboratories' compliance with specific accreditation criteria. These platforms provide information on amendments to laws and regulations regarding requirements for accredited entities, answers to questions that arise during the practical implementation of testing laboratories' own approaches to building their quality management system as a whole and its individual components, and the opportunity to gain new knowledge and competencies.

Key words: testing laboratory, mandatory conformity assessment, accreditation criteria, quality management system, risk-based approach.

Authors' personal contribution

Kaduka M.V. – scientific management of the study, determination of the aim of the study, development of the study design, formulation of the scientific conjectures, processing, and analysis of results, writing the text of the article.

Bekyasheva T.A. – search and analysis of literature, analysis and interpretation of the results, editing the text of the article.

Ivanov S.A. – search and analysis of literature, analysis and interpretation of the results, translation.

Stupina V.V. – development of the study design, editing the text of the article.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

References

1. Skripko LE. Formation of views on quality management. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment = Bulletin of St. Petersburg University. Management*. 2022;21(3): 395–428. DOI: 10.21638/11701/spbu08.2022.304. (In Russian).

St. Petersburg University. Management. 2022;21(3): 395–428. DOI: 10.21638/11701/spbu08.2022.304. (In Russian).

2. ISO/IEC 17025:2017: what the upcoming GOST has in store for us. Author: Andrey Gorbunov. Available from: <https://kachestvo.pro/kachestvo-produktsii/ispytaniya-i-izmereniya/iso-mek-17025-2017-chto-gost-gryadushchiy-nam-gotovit/> (Accessed October 15, 2025) (In Russian).
3. Borzov VI. Application of risk management for the implementation of risk-oriented thinking in the quality management system. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. - 2022. - No. 8. - Pp. 7-10. - DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-7-10. 8. (In Russian).
4. Zhemchugov AM, Zhemchugov MK. Management of the XXI century. Retrospective and prospect (part 2). *Menedzhment segodnya = Management today*. 2024;4: 262-277. Available from: <https://grebennikon.ru/article-4emb.html> (Accessed October 15, 2025) (In Russian).
5. Gorbunov AV. Risk management in the ISO 9001:2015 standard. *Menedzhment kachestva = Quality management*. 2018;4: 262–271. URL: <https://grebennikon.ru/article-3dvh.html> (Accessed October 15, 2025) (In Russian).

Marina V. Kaduka

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

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

6. Kartvelishvili VM, Sviridova OA. Risk management. Risk assessment methods. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics; 2017. 120 p. (In Russian).
7. Romanycheva KS, Spiridonov DM. Typical risks and capabilities of the measuring instrument verification process. International youth scientific conference "Physics. Technologies. Innovations." Ekaterinburg. May 18-22; 2020. P. 260-267 (In Russian).
8. Badalova AG, Tokhunts NB. Regulation of risk management processes in modern risk management. *Vestnik MG TU "Stankin" = Bulletin of MSTU "Stankin"*. 2021;1(56): 118-124 (In Russian).
9. Lyubimova TA. Internal control and risk management System: towards maturity. *Menedzhment kachestva = Quality management*. 2018;4: 254-260. Available from: <https://grebennikon.ru/article-q4ol.html> (Accessed October 15, 2025) (In Russian).

Received: October 20, 2025

For correspondence: **Marina V. Kaduka** – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Head of the Radiochemical Laboratory, 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: kaduka@mail.ru)
ORCID: 0009-0009-6970-4536

Tamara A. Bekyasheva – Lead Research Engineer Radiochemical Laboratory Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0009-0008-6047-4116

Sergey A. Ivanov – Junior Research Fellow Radiochemical Laboratory Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0003-4955-5261

Veronika V. Stupina – Lead Research Engineer Radiochemical Laboratory Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia.
ORCID: 0009-0002-7365-8519

For citation: Kaduka M.V., Bekyasheva T.A., Ivanov S.A., Stupina V.V. Issues of the ensuring of radiation control testing laboratories correspondence to accreditation criteria. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 94–102. (In Russian). DOI: [10.21514/1998-426X-2025-18-4-94-102](https://doi.org/10.21514/1998-426X-2025-18-4-94-102)

Программно-аппаратный комплекс «Радуризация» и система добровольной сертификации «Добросовестные практики» как основа системы контроля и прослеживаемости Роспотребнадзора в сфере радиационных биотехнологий

Кузьмин С.В.¹, Есаурова О.В.¹, Мощенская Н.В.^{1,2}, Русаков В.Н.¹, Горина И.Е.^{1,2}

¹ Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Московская область, Мытищи, Россия

² Малое инновационное предприятие «Научно-производственный центр им. Ф.Ф. Эрисмана», Тула, Россия

Для обеспечения безопасности применения радиационных биотехнологий, меняющих свойства продукта, требуется абсолютная прозрачность и контроль. В настоящее время в Российской Федерации не реализован контроль деятельности центров радиационной обработки в части соблюдения санитарно-эпидемиологических требований к процессу обработки, а также безопасности и качества облученной продукции со стороны регулирующих органов. Цель работы – на основе анализа современных подходов к регулированию отрасли радиационных технологий и проведенных экспериментов по исследованию влияния облучения на свойства пищевой и сельскохозяйственной продукции, научно обосновать и разработать основу национальной системы нормирования, контроля и прослеживаемости в сфере радиационных биотехнологий для обеспечения прослеживаемости оборота, качества и безопасности обработанной ионизирующим излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции. В работе рассмотрены современные подходы к регулированию отрасли радиационных технологий на основе государственного нормирования, дистанционного контроля и оценки соответствия услуг обработки и облученной продукции. На основе проведенного анализа установлены приоритетные для обработки ионизирующими излучением виды пищевой и сельскохозяйственной продукции, методы идентификации, контроля качества и безопасности облученной продукции и методы определения поглощенной продукцией дозы излучения. На основе проведенных научных исследований разработаны алгоритмы и процедуры эксперимента для установления максимального и минимального уровней излучения, установлены оптимальные технологические режимы и уровни облучения для ряда приоритетных видов продукции. Разработан специальный программно-аппаратный комплекс «Радуризация» на базе современных средств дистанционного контроля и искусственного интеллекта, а также система добровольной сертификации центров обработки ионизирующими излучением и облученной продукции «Добросовестные практики», обоснована их ключевая роль и необходимость промышленного внедрения в качестве основы системы контроля и прослеживаемости Роспотребнадзора в сфере радиационных биотехнологий.

Ключевые слова: радиационная обработка, ионизирующее излучение, средства дистанционного контроля, гигиеническое нормирование, программно-аппаратные комплексы, микробиологическая безопасность, дозиметрический контроль, прослеживаемость, радиационные биотехнологии, сертификация.

Введение

Улучшение качества и снижение потерь при хранении и транспортировке пищевой и сельскохозяйственной продукции является одной из важнейших задач обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации (РФ)¹. Данная задача стоит в сегодняшних реалиях остро как никогда, а ее решение невозможно без внедрения современных технологий.

Одним из наиболее эффективных решений проблемы микробной контаминации, зараженности насекомыми-вредителями, а также продления сроков хранения и сроков годности пищевой и сельскохозяйственной продукции является радиационная обработка [1–18].

Технология обработки ионизирующими излучением признана Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединённых Наций (ФАО) безопасной и перспективной

¹ Указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» с изменениями, внесенными Указом Президента Российской Федерации от 10.03.2025 № 141 [Decree of the President of the Russian Federation dated 01/21/2020 No. 20 "On Approval of the Food Security Doctrine of the Russian Federation" as amended by Decree of the President of the Russian Federation dated March 10, 2025 No. 141 (In Russ.)]

Горина Ирина Евгеньевна

Научно-исследовательский центр радиационных биотехнологий

Адрес для переписки: 141014, Россия, Московская область, Мытищи, ул. Семашко, д. 2; E-mail: gorina.ie@fnccg.ru

и уже более 45 лет применяется практически во всех передовых странах мирах [8–11]. Основные направления применения радиационных биотехнологий сегодня включают обеззараживание специй, сухофруктов, зернового сырья, продовольственного сырья животного происхождения, мясных и рыбных полуфабрикатов, готовых к употреблению пищевых продуктов.

Однако для обеспечения безопасности применения радиационных биотехнологий, меняющих свойства пищевых продуктов, требуется абсолютная прозрачность и контроль. В международной практике безопасность облученных пищевых продуктов обеспечивается нормированием уровней облучения для различных видов продукции и обязательным контролем соблюдения разрешенного диапазона при обработке продукции (ГОСТ ISO 14470-2014²).

В процессе обработки поглощенная продуктом доза излучения должна укладываться в разрешенный диапазон:

$$D_{min} \leq D_{\text{погл.продуктом}} \leq D_{max} \leq 10, \text{ кГр}$$

где D_{max} – максимальный допустимый уровень ионизирующего излучения для обработки продукции конкретного вида, безопасный для человека, не ухудшающий ее качественные характеристики и питательную ценность;

D_{min} – минимальный уровень ионизирующего излучения, эффективный в отношении конкретного вида продукции для достижения конкретной цели.

Обработка пищевой и сельскохозяйственной продукции ионизирующим излучением разрешена действующими тех-

ническими регламентами Таможенного союза/Евразийского экономического союза (Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» ТР ТС 021/2011³, Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» ТР ЕАЭС 040/2016⁴) и включена в Постановление Правительства РФ от 09 августа 2016 года № 768 «Перечень видов работ по карантинному фитосанитарному обеззараживанию»⁵.

Однако действующие технические регламенты ТС/ЕАЭС не устанавливают санитарно-эпидемиологических требований к процессу обработки продукции ионизирующими излучением, а также гигиенических норм в отношении уровней облучения. Действующие государственные стандарты по обработке ионизирующими излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции (ГОСТ 33339-2015⁶, ГОСТ 33340-2015⁷, ГОСТ 33302-2015⁸, ГОСТ 33271-2015⁹, ГОСТ 33820-2016¹⁰, ГОСТ 34154-2017¹¹, ГОСТ 33825-2016¹² и пр.) также не содержат верифицированных уполномоченными органами РФ норм облучения.

Таким образом, разработка современных инструментов регулирования отрасли обработки продукции ионизирующими излучением, включая алгоритмы гигиенического нормирования, является актуальной и необходимой.

Цель исследования – на основе анализа современных международных и региональных подходов к регулированию отрасли радиационных технологий разработать концепцию и основные элементы национальной системы нормирования, контроля и прослеживаемости в сфере радиационных биотехнологий.

²ГОСТ ISO 14470-2014 Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением [GOST ISO 14470-2014 Radiation treatment of food products. Requirements for the development, validation and day-to-day control of the process of food irradiation with ionizing radiation (In Russ.)]

³Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011), утвержденного решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 880 [Technical Regulations of the Customs Union "On Food Safety" (TR CU 021/2011), approved by the decision of the Commission of the Customs Union dated 09.12.2011 No. 880 (In Russ.)]

⁴Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» (ТР ЕАЭС 040/2016), утвержденный решением Совета Евразийской экономической комиссии от 18.10.2016 № 162 [Technical Regulations of the Eurasian Economic Union "On the Safety of fish and fish products" (EAU TR 040/2016), approved by the decision of the Council of the Eurasian Economic Commission dated 18.10.2016 No. 162 (In Russ.)]

⁵Постановление Правительства Российской Федерации от 09.08.2016 № 768 «Об установлении видов работ по карантинному фитосанитарному обеззараживанию» [Decree of the Government of the Russian Federation of August 9, 2016 No. 768 "On the establishment of types of quarantine phytosanitary disinfection" (In Russ.)]

⁶ГОСТ 33339-2015 «Облучение пищевых продуктов. Термины и определения» [GOST 33339-2015 "Irradiation of food products. Terms and definitions" (In Russ.)]

⁷ГОСТ 33340-2015 «Пищевые продукты, обработанные ионизирующим излучением. Общие положения» [GOST 33340-2015 "Food products treated with ionizing radiation. General provisions" (In Russ.)]

⁸ГОСТ 33302-2015 «Продукция сельскохозяйственная свежая. Руководство по облучению в целях фитосанитарной обработки» [GOST 33302-2015 "Fresh agricultural products. Guidelines on exposure for phytosanitary treatment" (In Russ.)]

⁹ГОСТ 33271-2015 «Пряности сухие, травы и приправы овощные. Руководство по облучению в целях борьбы с патогенными и другими микроорганизмами» [GOST 33271-2015 "Dry spices, herbs and vegetable seasonings. Guidelines on radiation for the control of pathogenic and other microorganisms" (In Russ.)]

¹⁰ГОСТ 33820-2016 «Мясо свежее и мороженое. Руководство по облучению для уничтожения паразитов, патогенных и иных микроорганизмов» [GOST 33820-2016 "Fresh meat and ice cream. Guidelines on radiation for the destruction of parasites, pathogens and other microorganisms" (In Russ.)]

¹¹ГОСТ 34154-2017 «Руководство по облучению рыбы и морепродуктов с целью подавления патогенных и вызывающих порчу микроорганизмов» [GOST 34154-2017 "Guidelines for irradiation of fish and seafood in order to suppress pathogenic and spoilage-causing microorganisms" (In Russ.)]

¹²ГОСТ 33825-2016 «Полуфабрикаты из мяса упакованные. Руководство по облучению для уничтожения паразитов, патогенных и иных микроорганизмов» [GOST 33825-2016 "Packaged semi-finished meat products. Guidelines on radiation for the destruction of parasites, pathogens and other microorganisms" (In Russ.)]

Задачи исследования

1. Определение приоритетных видов продукции, подлежащих облучению;
2. Разработка и аprobация процедур и алгоритмов экспериментов для установления эффективных и безопасных диапазонов доз излучения при обработке;
3. Обоснование оптимальных технологических режимов облучения, верификация методов оценки качества и безопасности продукции после обработки;
4. Разработка, промышленная аprobация и внедрение практических инструментов дистанционного контроля услуг обработки ионизирующим излучением и прослеживаемости облученной продукции со стороны уполномоченных органов.

Материалы и методы

Работа была выполнена путем сравнительного анализа текстов государственных стандартов РФ, технических регламентов ТС/ЕАЭС, международных регулирующих документов МАГАТЭ, ВОЗ, ФАО, а также проведения экспериментальной части для аprobирования алгоритмов и процедур установления оптимальных режимов обработки, включая эффективные и безопасные уровни облучения. Образцы продукции для определения зависимости показателей качества и безопасности от уровня ионизирующего излучения подвергали радиационной обработке линейным ускорителем электронов модели УЭЛР-10-10С2 с энергией до 10 МэВ. Для проведения исследований облученной и контрольной продукции по показателям качества и безопасности применялись аттестованные методики, включенные в Перечни стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований соответствующих технических регламентов ТС/ЕАЭС и осуществления оценки (подтверждения) соответствия продукции.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного анализа отечественных и международных документов, содержащих современные подходы к регулированию отрасли радиационных

технологий, а также экспериментальных научных исследований, Научно-исследовательским центром радиационных биотехнологий Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора (далее – НИЦ РадБиотех), выполняющим функции национального референс-центра в области радиационных биотехнологий, достигнуты следующие результаты: определены приоритетные виды продукции, подлежащие облучению; разработаны и аprobированы процедуры и алгоритмы экспериментов по установлению минимальных и максимальных доз облучения; экспериментально обоснованы оптимальные технологические режимы облучения для приоритетных видов продукции; верифицированы методы оценки качества и безопасности продукции после обработки и установлены надежные маркеры радиационного воздействия (основа для методов идентификации, позволяющих выявлять облученные продукты на рынке).

К приоритетным видам продукции, подлежащим радиационной обработке, относятся, прежде всего, продукты с чрезвычайно высоким риском микробной контаминации: мясо, птица, рыба и морепродукты, свежие овощи, зелень и фрукты, где термо- или химическая обработка не применимы. В число приоритетных входят также сухофрукты, специи, чай и какао-порошок, часто импортируемые с высоким уровнем микробной обсемененности, а также стратегически важные зерно и мука, где необходимо решить проблему вредителей при длительной логистике и хранении.

Для обоснования и установления оптимальных режимов обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции ионизирующими излучением, включая разрешенный диапазон уровней излучения, образцы продукции подвергались обработке ионизирующими излучением и исследовались по показателям качества и безопасности в соответствии с утвержденными программами эксперимента. В результате проведенных исследований установлены оптимальные режимы обработки отдельных приоритетных видов пищевой и сельскохозяйственной продукции (более 30 групп продукции), включая максимальные и минимальные уровни облучения (табл.).

Таблица**Библиотека знаний программно-аппаратного комплекса «Радуризация» (выдержка)***[Table]***Knowledge Library of the Radurization Package (excerpt)**

Облучаемые продукты [Irradiated products]	Цель облучения [The purpose of irradiation]	Уровень облучения [Radiation exposure level] (Dmin–Dmax)	Технологические режимы обработки [Technological modes of processing]
Грудка куриная охлажденная [Chilled chicken breast]	Снижение количества микроорганизмов, устранение паразитов/ Увеличение срока годности [Reducing the number of microorganisms, eliminating parasites/ Increased shelf life]	1–4 кГр [kGy]	Энергия электронов – 9,8 МэВ; Ширина развертки пучка - 60x15 см, 60x23 см;
Орехи свежие [Fresh nuts]	Снижение количества микроорганизмов и болезнетворных бактерий/ Увеличение срока хранения [Reducing the number of microorganisms and pathogenic bacteria/ Increasing shelf life]	0,1–1 кГр [kGy]	Технологическая загрузка – меньше ширины развертки пучка;

Окончание таблицы

Облучаемые продукты [Irradiated products]	Цель облучения [The purpose of irradiation]	Уровень облучения [Radiation exposure level] (Dmin–Dmax)	Технологические режимы обработки [Technological modes of processing]
Курага, изюм, чернослив [Dried apricots, raisins, prunes]	Снижение количества микроорганизмов и уничтожение насекомых-вредителей/ Увеличение срока хранения [Reducing the number of microorganisms and destroying insect pests/ Increased shelf life]	1–4 кГр [kGy]	Скорость обработки – 5-6 т/час (для зерна – 6-8 т/час); Частота импульсов – 250 Гц;
Перец черный молотый [Ground black pepper]	Снижение количества микроорганизмов [Reducing the number of microorganisms]	4–10 кГр [kGy]	Ток пучка электронов – 1,1 мА; Ток клистрона 79,3 А
Треска атлантическая свежемороженая [Atlantic fresh frozen cod]	Снижение количества патогенных микроорганизмов и паразитов/ Увеличение срока годности [Reducing the number of pathogenic microorganisms and parasites/ Increased shelf life]	0,5–3 кГр [kGy]	[The energy of electrons is 9.8 MeV;
Фарш свино-говяжий охлажденный [Minced pork and beef, chilled]	Снижение количества патогенных микроорганизмов и паразитов/ Увеличение срока годности [Reducing the number of pathogenic microorganisms and parasites/ Increased shelf life]	1–3 кГр [kGy]	Beam sweep width – 60x15 cm, 60x23 cm; Technological loading is less than the width of the beam sweep;
Зерно пшеницы [Grain of wheat]	Снижение количества патогенных микроорганизмов/ Уничтожение вредителей/ Продление срока хранения [Reducing the number of pathogenic microorganisms/ Pest control / Prolonging shelf life]	0,1–4 кГр [kGy]	Processing speed – 5-6 t/hour (for grain – 6-8 t/hour); Pulse frequency – 250 Hz;
Зелень и свежие огурцы [Greens and fresh cucumbers]	Снижение количества микроорганизмов и вредителей/ Подавление прорастания корнеплодов/ Увеличение срока хранения [Reducing the number of microorganisms and pests/ Suppression of root crop germination/ Increased shelf life]	1–4 кГр [kGy]	The electron beam current is 1.1 mA; Klystron current 79.3 A]

НИЦ РадБиотех совместно с малыми инновационными предприятиями ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана разработал основу системы контроля и прослеживаемости в области радиационных биотехнологий: специальный программно-аппаратный комплекс (ПАК) «Радуризация» [19, 20] на основе инновационных средств дистанционного контроля и технологий искусственного интеллекта, а также систему добровольной сертификации центров радиационной обработки и облученной продукции «Добросовестные практики» [21, 22].

Подобные автоматизированные системы дистанционного контроля и оценки соответствия уполномоченных органов в настоящее время не применяются на территории РФ [23, 24].

ПАК «Радуризация» – это современная, масштабируемая и полностью адаптивная система, представляющая собой набор сервисов для всех участников отрасли обработки продукции ионизирующим излучением (рис. 1).

Сервис гигиенического нормирования – используя инструменты ПАК «Радуризация», НИЦ РадБиотех совместно с профильными лабораториями планирует и проводит исследования воздействия ионизирующего излучения на показатели качества и безопасности пищевой и сельскохозяйственной продукции для установления Роспотребнадзором гигиенических нормативов.

Сервис разработки нормативной правовой документации ПАК «Радуризация» позволяет провести необходимые расчеты при валидации методик обработки

НИЦ РадБиотех и создания в техническом комитете Ростандарта СМАРТ-стандартов¹³ на их основе. В ПАК «Радуризация» размещаются утвержденные гигиенические нормативы, методики обработки и СМАРТ-стандарты в машиночитаемом формате.

Сервис координации предоставляет центрам обработки после сертификации в СДС «Добросовестные практики» доступ к «Библиотеке знаний» с утвержденными гигиеническими нормативами, методиками обработки и СМАРТ-стандартами. ПАК «Радуризация» позволяет координировать деятельность центров обработки и обеспечивать их заказами с учетом территориального признака, технического оснащения и текущей загрузки.

Сервис личных кабинетов заказчиков предоставляет изготовителям и поставщикам продукции возможность разместить заказ на ее обработку ионизирующими излучением и взаимодействовать с экспертами НИЦ РадБиотех и центром обработки. В ПАК «Радуризация» заказчик на основе результатов дистанционного контроля и выборочных испытаний в подведомственных Роспотребнадзору лабораториях получает протокол обработки и сертификат качества и безопасности в СДС «Добросовестные практики» на каждую партию обработанной продукции в центре обработки, подключенном к Системе, а также уникальный QR-код, обеспечивающий прослеживаемость маркированной продукции от центра обработки до конечного потребителя.

¹³СМАРТ-стандарты - вид стандартов в формате структурированных машиночитаемых моделей данных, которые позволяют автоматизировать процессы контроля на производстве [SMART standards are a type of standards in the format of structured machine-readable data models that enable automation of control processes in production].



Рис. 1. Функциональные сервисы ПАК «Радуризация» для участников рынка услуг по обработке пищевой и сельскохозяйственной продукции ионизирующим излучением

[Fig. 1. Functional services of the PAC Radurization for participants in the market of services for processing food and agricultural products with ionizing radiation]

Сервис контроля деятельности центров обработки
ПАК «Радуризация» позволяет дистанционно контролировать весь процесс обработки продукции в режиме реального времени, включая безопасный уровень излучения, за счет интеграции с системами управления оборудованием обрабатывающего центра и независимого инструментального контроля хода обработки. Безопасность – главный критерий при применении радиационных технологий в пищевой отрасли. Принципиально важно, чтобы обработка не только эффективно снижала микробную нагрузку, но и сохраняла все свойства продукта, не создавала дополнительных угроз для потребителя. Контролирующему органу необходимо иметь уверенность, что обработка проводилась строго в соответствии с утвержденными нормативами и методиками, обеспечивающими ее эффективность и безопасность. Гигиенические нормативы, методики обработки и СМАРТ-стандарты, загруженные в ПАК «Радуризация» в машинораспознаваемом формате, применяются информационными системами и технологическим оборудованием центра радиационной обработки напрямую, без участия человека. Например, при выходе уровня ионизирующего излучения за установленные пределы сработает система оповещения контролирующему органу и остановки радиационно-технологической установки, обработанная продукция в этом случае будет подлежать утилизации.

Лабораторный сервис ПАК «Радуризация» позволяет организовать проведение испытаний обработанной продукции в подведомственных Роспотребнадзору лабораториях, обработать и обобщить их результаты.

ПАК «Радуризация» дает возможность фиксировать каждый этап и сохранять всю историю процесса обработки – от приемки продукции до ее выхода на рынок. Такая прозрачность даёт потребителю уверенность в безопасности, является эффективным инструментом надзора за рынком.

Сервис проверки в автоматическом режиме сверяет

данные о товаре, стандарте обработки, фактических условиях и лабораторных испытаниях; в случае выявления несоответствий выдает контролирующему органу задачу на детальную проверку.

Кроме того, ПАК «Радуризация» содержит **сервисы для контрольных надзорных органов**, позволяющие им получать необходимую информацию об обработке продукции ионизирующим излучением, осуществлять контроль за обращением облученной продукции на территории РФ.

ПАК «Радуризация» разработан полностью на российском программном обеспечении и прошёл необходимые проверки на отсутствие уязвимостей и соответствие обязательным требованиям в области информационной безопасности.

Совместно с Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» (ГК «Росатом») и подведомственными лабораториями Роспотребнадзора проведена комплексная апробация и отладка ПАК «Радуризация», подтвердившая готовность системы к масштабному использованию.

ПАК «Радуризация» и СДС «Добросовестные практики» создают основу функционирования системы контроля и прослеживаемости Роспотребнадзора в области обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции ионизирующим излучением (рис. 2).

В соответствии с Дорожной картой развития отрасли радиационных биотехнологий в РФ, утвержденной ГК «Росатом» и Роспотребнадзором, до конца 2026 года к ПАК «Радуризация» должны подключиться все действующие центры сети. В 2027 году в ПАК «Радуризация» будет реализован модуль прослеживаемости обработанной продукции от центра до полки магазина и модуль выявления на рынке облученной немаркованной продукции, будет организовано подключение к ПАК «Радуризация» зарубежных центров радиационной обработки.

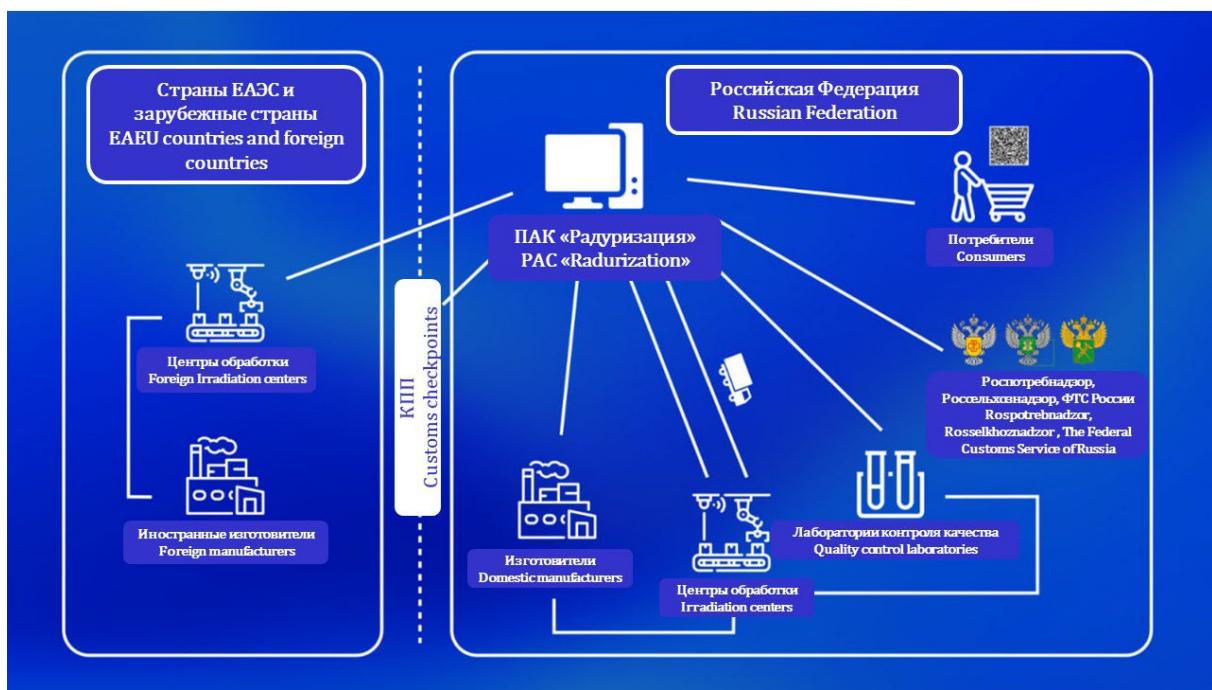


Рис. 2. Принцип функционирования системы контроля и прослеживаемости в области обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции ионизирующими излучением на основе ПАК «Радуризация» и СДС «Добросовестные практики»

[Fig. 2. The principle of functioning of the control and traceability system in the field of processing food and agricultural products with ionizing radiation based on the PAC Radurization and SDC the Good Practices]

Заключение

Таким образом, обоснована и разработана концепция единой системы нормирования, контроля и прослеживаемости Роспотребнадзора в сфере радиационных биотехнологий для обеспечения качества и безопасности обработанной ионизирующими излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции, а также разработаны основные элементы такой системы.

Разработан специальный программно-аппаратный комплекс «Радуризация» на базе современных средств дистанционного контроля и искусственного интеллекта, а также система добровольной сертификации центров обработки и облученной продукции «Добросовестные практики» на основе действующего законодательства РФ и ЕАЭС с применением наилучших международных практик оценки соответствия.

Внедрение единой системы контроля и прослеживаемости Роспотребнадзора в области ионизирующего излучения на основе ПАК «Радуризация» и СДС «Добросовестные практики» создаст предпосылки для обеспечения безопасности и легализации обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции ионизирующими излучением, что, в свою очередь, даст толчок для развития национальной отрасли радиационных биотехнологий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кузьмин С.В., Есаулова О.В. определили цели и задачи исследования, разработали дизайн исследования.

Мощенская Н.В. провела анализ данных, написала текст статьи, подготовила окончательный вариант рукописи.

Русаков В.Н. спланировал проведение эксперименталь-

ной части исследования, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Горина И.Е. провела сбор и обработку материала, редактировала промежуточный вариант рукописи.

Ответственность за целостность всех частей статьи несут все авторы.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование проведено за счет субсидии на выполнение исследований по Государственному заданию номер в ЕГИСУ НИОКТР 124030700031-1 ФБУН «ФНЦ им. Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора.

Литература

1. Денисикова Н.Ф., Гаспарян С.В., Дьяконова М.Е. и др. Защита сельскохозяйственных культур от вредных организмов в периоды ухода и хранения. М.: Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 2021. 108 с. URL: https://www.elibrary.ru/KVG_GUR (Дата обращения 24.10.2025).
2. Chemist's handbook in the XXI century. Онлайн-ресурс. URL: <https://www.chem21.info/info/914632> (Дата обращения 24.10.2025).
3. Отчет Международной Консультативной группы ВОЗ/ФАО/МАГАТЭ по облучению пищевых продуктов Codex document CAC (1983). Микробиологическая безопасность облученных пищевых продуктов, CX/FH/83/9. Rome: Бюллетень МАГАТЭ, 1989. № 1. С. 40-44.
4. Byron D.H., Luckman G.J. Food Environ // Protection Newsletter. 2009. Vol. 12, № 1. P. 4-8.
5. Международная Консультативная группа по облучению пищевых продуктов ВОЗ/ФАО/МАГАТЭ. Микробиологич

- еские критерии для пищевой продукции, подлежащей обработке ионизирующим излучением, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1989.
6. Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech. Report Ser. 659. Geneva: World Health Organization, 1981.
 7. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. WHO, Technical Report Series N 890. Geneva. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10524010/> (Дата обращения: 24.10.2025).
 8. Codex Alimentarius. CODEX STAN 106-1983 (Rev.1-2003) «General Standard for Irradiated Foods». Rome: FAO/WHO. URL: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/tr/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B106-1983%252FCXS_106e.pdf (Дата обращения: 24.10.2025).
 9. Directive 1999/3/EC of 22 February 1999 establishing a Community list of foods and food ingredients treated with ionising radiation (OJ L 66, 13.03.1999). URL: <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC023200/> (Дата обращения 24.10.2025).
 10. Health Canada / CFIA. Food Irradiation – разрешённые категории и правила маркировки. Government of Canada. URL: <https://inspection.canada.ca/en/food-labels/labelling/industry/irradiated-foods> (Дата обращения 24.10.2025).
 11. China National Food Safety Standard GB 14891 «Irradiated Foods» (линейка стандартов GB 14891.x). Beijing: NHC/CFSN URL: https://www.cfs.gov.hk/english/programme_rafs/programme_rafs_ft_01_03_irfood.html (Дата обращения 24.10.2025).
 12. Русаков В.Н., Есаулова О.В. Влияние ионизирующего излучения на химические свойства и пищевую ценность мяса и мясопродуктов. Эрисмановские чтения – 2024. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: материалы II Всероссийского научного конгресса с международным участием. М., 2024. С. 92–93.
 13. Русаков В.Н., Есаулова О.В. Действие ионизирующего излучения на липиды в мясе и мясопродуктах. Эрисмановские чтения – 2024. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: материалы II Всероссийского научного конгресса с международным участием. М., 2024. С. 93–94.
 14. Есаулова О.В., Русаков В.Н. Экспериментальное изучение эффективности радиационной обработки некоторых видов овощной продукции. Эрисмановские чтения – 2024. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: материалы II Всероссийского научного конгресса с международным участием. М., 2024. С. 38–39.
 15. Русаков В.Н., Есаулова О.В. Влияние ионизирующего излучения на витамины в мясе при его радиационной обработке. Эрисмановские чтения – 2024. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: материалы II Всероссийского научного конгресса с международным участием. М., 2024. С. 91–92.
 16. Русаков В.Н. Влияние ионизирующего излучения на пищевую ценность продуктов. Тезисы докладов научно-практической конференции «Перспективы дезинфектологии. Актуальные вопросы обработок в современном пищевом производстве». М., 2024. С. 112–114.
 17. Кузьмин С.В., Русаков В.Н., Есаулова О.В., Сетко А.Г. Безопасность пищевых продуктов, подвергнутых обработке ионизирующим излучением (обзор литературы) // Здравоохранение Российской Федерации. 2025. Т. 6, № 9(1). С. 60–64.
 18. Esaulova O.V., Barvina A.Ya., Moshchenskaya N.V., Rusakov V.N. Ensuring the safety and efficiency of processing food and agricultural products with ionizing radiation using remote control means. International Youth Forum Russia-Africa: Nuclear education-potential for successful regional development. Conference proceedings. 2025. P. 188–192. ISBN: 978-5-907954-44-1.
 19. Патент № 147323 Российской Федерации, МПКО 19-07. Схема «Принцип функционирования программно-аппаратного комплекса Радуризация (ПАК Радуризация)»: № 20255010980: заявлено 27.02.2025, опубликовано 06.05.2025 / Кузьмин С.В., Есаулова О.В., Никифоров С.И., Мошенская Н.В., Барвина А.Я.; патентообладатель ФБУН ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора. 2025. 1 с.
 20. Патент № 147324 Российской Федерации, МПКО 19-07. Схема «Алгоритм взаимодействия координационного центра с центрами обработки продукции посредством программно-аппаратного комплекса Радуризация»: № 2025501129: заявлено 28.02.2025, опубликовано 06.05.2025 / Кузьмин С.В., Есаулова О.В., Никифоров С.И.; патентообладатель ФБУН ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора. 2025. 1 с.
 21. Свидетельство о регистрации Системы добровольной сертификации «Добросовестные практики исполнения санитарно-эпидемиологических требований» (СДС «ДОБРОСОВЕСТНЫЕ ПРАКТИКИ») в Едином реестре зарегистрированных систем добровольной сертификации Росстандарта № РОСС RU.33053.04ЭПС0. URL: https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/compliance/VoluntaryAcknowledgement/reestr?portal:componetId=11f30a16-f554-4d49-a27a-e277ebf53b2f&portal:isSecure=false&portal:portletMode=view&navigationalState=JBPNs_rO0ABXdHAAZhY3Rpb24AAAABABBjb25jcmV0ZURvY3VtzW50AARmcm9tAAAAAQACMjAABmRvY19pZAAAAAEABDQ3ODIAB19fRU9GX18*&ysclid=mh4mwht0rq586713410 (Дата обращения: 24.10.2025).
 22. Патент № 147325 Российской Федерации, МПКО 19-07. Схема «Порядок сертификации продукции, обработанной ионизирующим излучением, с применением средств дистанционного контроля»: № 2025501110: заявлено 28.02.2025, опубликовано 06.05.2025 / Кузьмин С.В., Есаулова О.В., Мошенская Н.В., Барвина А.Я.; патентообладатель ФБУН ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора. 2025. 1 с..
 23. Роскомнадзор Реестр федеральных государственных информационных систем. URL: <https://46.rkn.gov.ru/p13908/> (Дата обращения: 24.10.2025).
 24. ФГБУ НТЦ «Информрегистр». Реестр федеральных государственных информационных систем. URL: <https://inforeg.ru/rfgis/itemlist/category/77-obshhiesvedeniya> (Дата обращения: 24.10.2025).

Поступила: 31.10.2025

Кузьмин Сергей Владимирович – доктор медицинских наук, профессор, директор Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Россия

ORCID: 0000-0002-0209-9732

Есаурова Ольга Владимировна – кандидат экономических наук, руководитель Научно-исследовательского центра радиационных биотехнологий (референс-центр в области радиационных технологий) Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Россия

ORCID: 0009-0007-1936-1673

Мощенская Нина Владимировна – кандидат химических наук, заместитель руководителя Научно-исследовательского центра радиационных биотехнологий (референс-центр в области радиационных технологий) Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; генеральный директор Малого инновационного предприятия «Научно-производственный центр им. Ф.Ф. Эрисмана», Мытищи, Россия

Русаков Владимир Николаевич – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского центра радиационных биотехнологий (референс-центр в области радиационных технологий) Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Россия

ORCID: 0000-0001-9514-9921

Горина Ирина Евгеньевна – ведущий специалист Научно-исследовательского центра радиационных биотехнологий (референс-центр в области радиационных технологий) Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; заместитель генерального директора по развитию Малого инновационного предприятия «Научно-производственный центр им. Ф.Ф. Эрисмана». **Адрес для переписки:** 141014, Московская область, Мытищи, ул. Семашко, д. 2; E-mail: gorina.ie@fnrg.ru

Для цитирования: Кузьмин С.В., Есаурова О.В., Мощенская Н.В., Русаков В.Н., Горина И.Е. Программно-аппаратный комплекс «Радуризация» и система добровольной сертификации «Добросовестные практики» как основа системы контроля и прослеживаемости Роспотребнадзора в сфере радиационных биотехнологий // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 103–112. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-103-112

“Radurizatsiya” software and hardware complex and “The Good Practices” Certification Scheme as the basis of the Rospotrebnadzor monitoring and traceability system in the field of radiation biotechnologies

Sergey V. Kuzmin¹, Olga V. Esaulova¹, Nina V. Moshenskaya^{1,2}, Vladimir N. Rusakov¹, Irina E. Gorina^{1,2}

¹ F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow Region, Mytishchi, Russia

² Small Innovative Enterprise "F.F. Erisman Research and Production Center", Tula, Russia

Absolute transparency and control are required to ensure the safety of radiation biotechnologies that change product properties. Currently, the Russian Federation has not implemented regulatory control over the activities of radiation treatment centers in terms of compliance with sanitary and epidemiological requirements for the treatment process, as well as the safety and quality of irradiated products. The purpose of the work is to scientifically substantiate and develop the basis of a national system of rationing, control and traceability in the field of radiation biotechnologies based on the analysis of modern approaches to regulating the radiation technology industry and experiments conducted to study the effects of radiation on the properties of food and agricultural products. To ensure traceability of turnover, quality and safety of food and agricultural products treated with ionizing radiation. The paper considers modern approaches to the regulation of the radiation technology industry based on state regulation, remote monitoring and conformity assessment of treatment services and irradiated products. Based on the analysis, priority types of food and agricultural products for ionizing radiation treatment, methods of identification, quality control and safety of irradiated products, and methods for determining the radiation dose absorbed by products have been established. Based on the conducted scientific research, the experimental algorithms and procedures have been developed to establish maximum and minimum radiation levels. The optimal technological modes and radiation levels have been established for a number of priority types of products. A special Radurization hardware and software complex based on modern remote control and artificial intelligence tools has been developed, as well as a system of voluntary certification of ionizing radiation treatment centers and irradiated products "Good Practices", their

Irina E. Gorina

Scientific Research Center “Radiation biotechnologies”

Address for correspondence: 2, Semashko str., Mytishchi, Moscow Region, 141014, Russia; E-mail: gorina.ie@fnrg.ru

key role and the need for industrial implementation as the basis of the Rospotrebnadzor monitoring and traceability system in the field of radiation biotechnologies have been substantiated.

Key words: *radiation treatment, ionizing radiation, remote monitoring, hygienic rationing, software and hardware complexes, microbiological safety, dosimetric control, traceability, radiation biotechnologies, certification.*

Authors' personal contribution

Kuzmin S.V., Esaulova O.V. defined the goals and objectives of the study, developed the design of the study.

Moshenskaya N.V. analyzed the data, wrote the text of the article, and prepared the final version of the manuscript.

Rusakov V.N. planned the experimental part of the study, edited the intermediate version of the manuscript.

Gorina I.E. conducted the collection and processing of the material, edited the intermediate version of the manuscript.

All authors are responsible for the integrity of all parts of the article.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was conducted at the expense of a subsidy for research on the State assignment number in EGISU R&D 124030700031-1 of the Federal budgetary establishment of science "F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene" of the Federal service for surveillance on consumer rights protect ion and human well-being.

References

1. Deniskina NF, Gasparyan SV, Dyakonova ME, Levshin AG, Gasparyan IN. Protection of crops from harmful organisms during periods of care and storage. Editorial Board of the journal "Mechanization and Electrification of agriculture", 2021; 108. Available from: <https://www.elibrary.ru/KVGGUR> [Accessed October 24, 2025] (In Russian).
2. Chemist's handbook in the XXI century. Online resource. [cited 2023 Nov 23]. Available from: <https://www.chem21.info/info/914632>. [Accessed October 24, 2025]
3. Report of the WHO/FAO/IAEA International Advisory Group on Food Irradiation Codex document CAC (1983). The Microbiological Safety of Irradiated Food. Codex Alimentarius Commission, CX/FH/83/9, Rome. *IAEA Bulletin*. 1989;1: 40–44.
4. Byron DH, Luckman GJ. Food Environ. *Protection Newsletter*. 2009; 2(1): 4–8.
5. Consultation on Microbiological Criteria for Foods to be Further Processed by Irradiation, World Health Organization, Geneva, Switzerland; 1989.
6. Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Ex-pert Committee. Tech. Report Ser. 659. Geneva: World Health Organization; 1981.
7. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. WHO, Technical Report Series No. 890. Geneva. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10524010/> [Accessed October 24, 2025].
8. Codex Alimentarius. CODEX STAN 106-1983 (Rev.1-2003) «General Standard for Irradiated Foods». Rome: FAO/WHO. Available from: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/tr/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B106-1983%252FCXS_106e.pdf [Accessed: October 24, 2025].
9. Directive 1999/3/EC of 22 February 1999 establishing a Community list of foods and food ingredients treated with ionising radiation (*OJ L 66, 13.03.1999*).
10. Health Canada / CFIA. Food Irradiation. *Government of Canada*. Available from: <https://inspection.canada.ca/en/food-labels/labelling/industry/irradiated-foods> [Accessed: October 24, 2025].
11. China National Food Safety Standard GB 14891 «Irradiated Foods» (China National Food Safety Standard GB 14891.x). Beijing: NHC/CFSAN. Available from: https://www.cfs.gov.hk/english/programme/programme_rafs/programme_rafs_ft_01_03_irfood.html [Accessed: October 24, 2025].
12. Rusakov VN, Esaulova OV. The effect of ionizing radiation on the chemical properties and nutritional value of meat and meat products. Erisman Readings – 2024. New in nutrition and food hygiene to ensure the sanitary and epidemiological well-being of the population: proceedings of the II All-Russian Scientific Congress with International Participation, Moscow; 2024. P. 92–93. (In Russian).
13. Rusakov VN, Esaulova OV. The effect of ionizing radiation on lipids in meat and meat products. Erisman Readings – 2024. New developments in nutrition and food hygiene to ensure the sanitary and epidemiological well-being of the population: proceedings of the II All-Russian Scientific Congress with International Participation, Moscow; 2024. P. 93–94. (In Russian).
14. Esaulova OV, Rusakov VN. Experimental study of the effectiveness of radiation treatment of certain types of vegetable products. Erisman Readings – 2024. New developments in nutrition and food hygiene to ensure the sanitary and epidemiological well-being of the population: proceedings of the II All-Russian Scientific Congress with International Participation, Moscow; 2024. P. 38–39. (In Russian).
15. Rusakov VN, Esaulova OV. The effect of ionizing radiation on vitamins in meat during its radiation treatment. Erisman Readings – 2024. New in nutrition and food hygiene to ensure the sanitary and epidemiological well-being of the population: proceedings of the II All-Russian Scientific Congress with international participation, Moscow; 2024. P. 91–92. (In Russian).
16. Rusakov VN. The effect of ionizing radiation on the nutritional value of products. Abstracts of the scientific and practical conference "Prospects of disinfection. Actual issues of treatments in modern food production". 2024. P. 112–114. (In Russian).
17. Kuzmin SV, Rusakov VN, Esaulova OV, Setko AG. Safety of food products treated with ionizing radiation (literature review). *Zdravookhranenie Rossii = Healthcare of the Russian Federation*. 2025;6,9(1): 60–64. (In Russian).
18. Esaulova OV, Barvina AY, Moshchenskaya NV, Rusakov VN. Ensuring the safety and efficiency of processing food and agricultural products with ionizing radiation using remote control means. International Youth Forum "Russia-Africa: Nuclear Education as a potential for successful development of the region". Collection of materials; 2025. P. 188–193. ISBN: 978-5-907954-44-1 (In Russian).
19. Patent No. 147323 Russian Federation, IPKO 19-07. Scheme "The principle of functioning of the Radurization software and hardware complex (Radurization package)": No. 20255010980: announced on 02/27/2025, published on <https://www.fizpatent.ru/patent/147323> [Accessed: October 24, 2025].

- 05/06/2025 / Kuzmin SV, Esaulova OV, Nikiforov SI, Moshenskaya NV, Barvina AYa; patent holder of the F.F. FNTSG. Erisman of Rospotrebnadzor; 2025. 1 p. (In Russian).
20. Patent No. 147324 Russian Federation, IPKO 19-07. Scheme "Algorithm of interaction of the coordination center with product processing centers through the Radurization software and hardware complex": No. 2025501129: announced on 02/28/2025, published on 05/06/2025 / Kuzmin SV, Esaulova OV, Nikiforov SI; patent holder of the F.F. FNTSG. Erisman of Rospotrebnadzor; 2025. 1 p. (In Russian).
21. Certificate of registration of the Voluntary Certification System "Fair practices in meeting sanitary and epidemiological requirements" (VTS "FAIR PRACTICES") in the Unified Register of Registered Voluntary Certification Systems of Rosstandart No. ROSS RU.Z3053.04EPS0. Available from: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/compliance/VoluntaryAcknowledgement/reestr?portal:componentId=11f30a16-f554-4d49-a27a-e277ebf53b2f&portal:isSecure=false&portal:portletMode=view&navigational>
- state=JBPNs_rO0ABXdHAAZhY3Rpb24AAAABBjb25jcmV0ZURVY3VtZW50AARmcm9tAAAAAQACMjAABmRvY19pZAA AAEABDQ3ODIAB19fRU9GX18*&ysclid=mh4mwh0rq586713410. [Accessed: October 24, 2025]. (In Russian).
22. Patent No. 147325 Russian Federation, IPKO 19-07. Scheme "Procedure for certification of products treated with ionizing radiation using remote control devices": No. 2025501110: announced on 02/28/2025, published on 05/06/2025 / Kuzmin SV, Esaulova OV, Moshenskaya NV, Barvina AYa; patent holder of the F.F. FNTSG. Erisman of Rospotrebnadzor; 2025. 1 p. (In Russian).
23. Roskomnadzor Register of Federal State Information Systems. Available from: <https://46.rkn.gov.ru/p13908> [Accessed: October 24, 2025]. (In Russian).
24. Federal State Budgetary Institution NTC "Informregister". Register of Federal State Information Systems. Available from: <https://inforeg.ru/rfgis/itemlist/category/77-obshhiesvedeniya>. [Accessed: October 24, 2025]. (In Russian).

Received: October 31, 2025

Sergey V. Kuzmin – Doctor of Medical Sciences, Professor, Director of F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Mytishchi, Moscow Region, Russia
ORCID: 0000-0002-0209-9732

Olga V. Esaulova – Candidate of Economic Sciences, Head of the Scientific Research Center "Radiation Biotechnologies" of F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Mytishchi, Moscow Region, Russia
ORCID: 0009-0007-1936-1673

Nina V. Moschenskaya – Candidate of Chemical Sciences, Deputy Head of the Scientific Research Center "Radiation Biotechnologies" of F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Head of the Small innovative enterprise "F.F. Erisman Scientific and Production Center", Mytishchi, Moscow Region, Russia

Vladimir N Rusakov – Candidate of Medical Sciences, Leader Researcher of the Department of F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Mytishchi, Moscow Region, Russia
ORCID: 0000-0001-9514-9921

For correspondence: **Irina E. Gorina** – Leader Researcher of the Scientific Research Center "Radiation biotechnologies" of F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Mytishchi, Moscow Region, Russia; Deputy Head of the Small innovative enterprise "F.F. Erisman Scientific and Production Center" (2, Semashko Str., Mytishchi, Moscow Region, 141014, Russia; E-mail: gorina.ie@fncg.ru)

For citation: Kuzmin S.V., Esaulova O.V., Moshenskaya N.V., Rusakov V.N., Gorina I.E. "Radurizatsiya" software and hardware complex and "The Good Practices" Certification Scheme as the basis of the Rospotrebnadzor monitoring and traceability system in the field of radiation biotechnologies. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 103–112. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-103-112

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-113-120

УДК: 621.039.8.002-051:546.798.22+.23

Ключевые аспекты декорпорации плутония и америция в случаях их аварийного поступления персоналу радиационно опасных производств

Соколова А.Б.

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

В условиях производства по переработке плутония, несмотря на достигнутое улучшение радиационной обстановки на рабочих местах, не исключена вероятность аварийных ситуаций, приводящих к острому ингаляционному поступлению радионуклидов или их поступлению через поврежденные кожные покровы. В таких случаях для предупреждения радиационных поражений или уменьшения риска их возникновения применяют хелаты. Цель настоящего исследования – изучить отечественные и зарубежные методические документы и определить степень полноты и достаточности содержащихся в них рекомендаций по выполнению декорпорации плутония и америция хелатными комплексами. Были рассмотрены общие рекомендации по применению хелатных комплексов, представленные в Публикации № 96 Международной комиссии по радиологической защите, документы Международного агентства по атомной энергии, а также документы Национального совета по радиационной защите и измерениям США и отечественные методические указания 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». Единые требования к порядку выполнения декорпорации в части кратности введения препарата и продолжительности курса декорпорации данными документами не устанавливаются, также не выработан единый подход к определению критерия для принятия решений о применении хелата и об окончании курса декорпорации. В настоящее время, пока не установлены единые критерии для принятия решения о начале декорпорационной терапии, следует руководствоваться принципом оперативности и начинать декорпорацию в кратчайшие сроки после предполагаемого или известного поступления. В дальнейшем тактика декорпорации должна определяться по мере поступления информации об оценках дозиметрических величин, с учетом состояния здоровья пострадавшего работника, не исключая возможность отложенного применения хелата.

Ключевые слова: плутоний, америций, декорпорация, хелат, пентацин.

Введение

В условиях производства по переработке плутония, несмотря на достигнутое улучшение радиационной обстановки на рабочих местах, не исключена вероятность аварийных ситуаций, приводящих к острому ингаляционному поступлению промышленных соединений плутония или их поступлению через поврежденные кожные покровы. В зависимости от технологических процессов, персонал может сталкиваться с различными по изотопному составу промышленными соединениями плутония, в которых присутствует, в том числе, альфа-активный ^{241}Am . Для предупреждения радиационных поражений или уменьшения риска их возникновения, в случаях аварийного поступления плутония и америция применяют хелатные комплексы (комплексные соединения) – соли диэтилентриаминпентауксусной кислоты (ДТПА) [1–3]. Между тем, в настоящее время отсутствуют клинические руководства и методические документы, позволяющие полноценно выполнять мероприятия по декорпорации [4, 5]. Вследствие этого, в 2023 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) инициировала проект, направленный на разработку руководств по оценке и управлению внутренним облучением трансуранными актинидами [4].

При принятии решения о выполнении декорпорации необходимо рассматривать совокупный риск и учитывать все факторы риска. Поступление трансуранных актинидов потенциально может привести к возникновению канцерогенных эффектов [4]. Декорпорационная терапия с использованием ДТПА отличается хорошей терапевтической переносимостью, не вызывая побочных эффектов при применении в рекомендованных дозах, тем не менее, может вызывать отдельные неблагоприятные последствия, такие как снижение в организме некоторых жизненно важных для здоровья элементов, бронхоспазм у пациентов с астмой при ингаляционном их применении, а также аллергическая кожная реакция [6]. Учитывая вышеизложенное, и принятие решения о выполнении декорпорации, и ее тактика должны основываться на совокупной оценке риска и пользы, полученной с привлечением специалистов, обеспечивающих дозиметрическое сопровождение.

Цель исследования – анализ отечественных и зарубежных методических документов для определения степени полноты и достаточности рекомендаций по выполнению декорпорации плутония и америция хелатными комплексами в случаях аварийного поступления персоналу радиационно опасных производств.

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

Общие принципы декорпорации радионуклидов

Основной целью защитных мер после выявления повышенного уровня поступления радионуклидов является снижение дозовой нагрузки для предупреждения радиационных поражений или уменьшения риска их возникновения [7].

На рисунке схематично представлены общие принципы декорпорации радионуклидов, которые заключаются в предотвращении отложения и перераспределения радионуклида в органах вторичного депонирования и выведении из органов и тканей, в которых радионуклид уже успел отложиться.

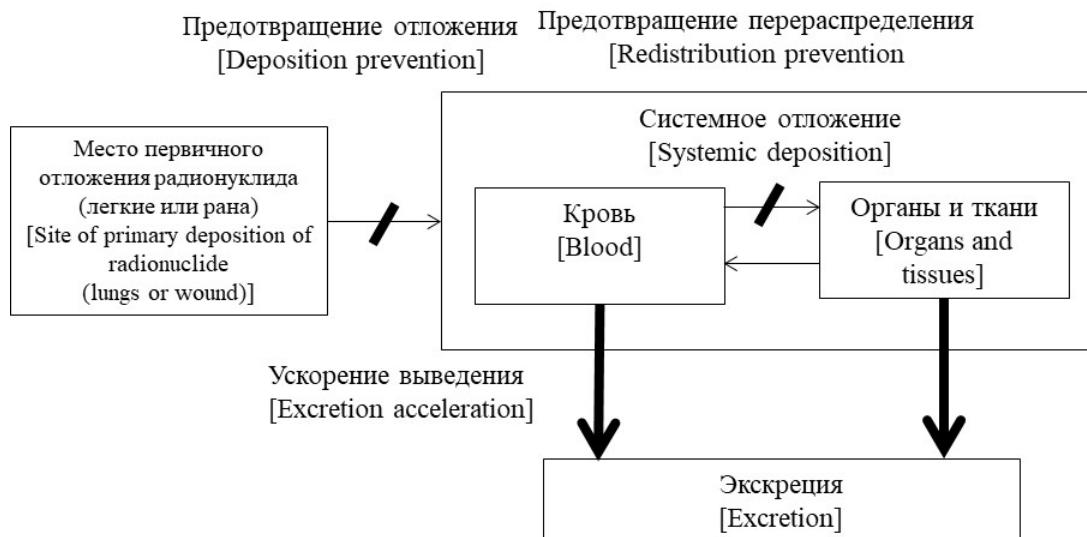


Рис. Общие принципы декорпорации радионуклидов
[Fig. General principles of radionuclide decorporation]

Применение ДТПА в форме соединения кальция или цинка в качестве лечебного препарата рекомендовано для лиц с известным или предполагаемым поступлением плутония и америция [7]. В отечественной практике в настоящее время используется только СадТПА – пентацин [8]. Руководствуясь обширными научными исследованиями, посвященными проблеме декорпорации актинидов с помощью хелатов, и анализом практического обращения со случаями аварийного поступления, можно сформулировать ряд положений, которые являются определяющими в тактике декорпорации:

- принятие первоначального решения о необходимости применения ДТПА на ранней фазе радиационной аварии;
- уровни доз или поступления, при которых принимается решение о применении ДТПА;
- способ введения препарата;
- дозировка препарата;
- кратность введения препарата;
- продолжительность курса.

Актуальные методические документы, содержащие рекомендации по выполнению декорпорации актинидов

Исторически основу для стандартов радиационной безопасности формирует Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), затем, опираясь на научные разработки МКРЗ, Международное агентство по атомной энергии

(МАГАТЭ) разрабатывает практические руководства. Общие рекомендации по применению хелатных комплексов рассмотрены в Публикации № 96 МКРЗ, а практические вопросы применения хелатных комплексов рассматриваются в документе «Общие процедуры медицинского реагирования во время ядерной или радиологической аварийной ситуации», опубликованном МАГАТЭ в рамках серии МАГАТЭ «Готовность и реагирование на аварийные ситуации» [7, 9]. Также в общих чертах эта проблема рассматривается в документе МАГАТЭ «Безопасное обращение с плутонием и его хранение» в пункте «Меры по уменьшению дозы при отложении плутония в организме» и документе «Медицинское обслуживание лиц, подвергшихся внутреннему загрязнению радионуклидами в условиях ядерной или радиационной аварийной ситуации» [10].

В документах Национального совета по радиационной защите и измерениям США (НКРЗ США) также приводятся общие требования к процедуре выполнения декорпорации радионуклидов [11, 12]. Основные положения для выполнения декорпорации (комплексонотерапии) установлены в отечественном методическом документе МУ 2.6.1.034-2014¹ «Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241», который определяет действия персонала в случаях поступления изотопов плутония и америция-241.

¹ 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.)]

Согласно позиции МКРЗ и МАГАТЭ, декорпорация радионуклидов после их поступления в подавляющем большинстве случаев выполняется для снижения риска долгосрочных последствий, а не для лечения острого радиационного поражения [10, 13]. Так как первичные оценки доз и поступления на основании результатов измерения активности в экскретах не могут быть получены немедленно, в большинстве случаев требуется принимать решение о начале декорпорации на основании либо оценок с большой неопределенностью, либо руководствуясь лишь предположениями о возможности и величине поступления. Следует помнить, что при поступлении изотопов плутония и америция наиболее эффективными являются оперативные действия [10]. Все вышеперечисленные документы МКРЗ и МАГАТЭ рекомендуют принимать меры по декорпорации «как можно скорее» после предполагаемого или известного поступления. Учитывая необходимость оперативного введения хелатного

комплекса, отечественным методическим документом МУ 2.6.1.034-2014, предусмотрено введение пентацина на здравпункте предприятия на этапе оказания доврачебной помощи¹. Тем не менее, при любом применении лекарственных средств должно рассматриваться соотношение пользы и риска. Каждый случай аварийного поступления должен быть обеспечен дозиметрическим и медицинским сопровождением.

В таблице приведены рекомендации к проведению декорпорации плутония и америция хелатами, изложенные в международных и отечественных¹ методических документах [9–12, 14]. Как видно из таблицы, четкие требования к порядку выполнения декорпорации в части продолжительности курса декорпорации не устанавливаются. Какие-либо рекомендации касательно кратности введения препарата в рассматриваемых документах не приводятся, рекомендуемая дозировка составляет от 0,5 до 1,0 г на инъекцию.

Таблица

Рекомендации к проведению курса декорпорации

[Table]

Recommendations for conducting a decorporation course]

Методический документ [Methodological document]	Рекомендации к выполнению декорпорации [Recommendations for performing decorporation]		
	Принятие первоначального решения [The initial decision]	Уровни вмешательства [Levels of intervention]	Продолжительность [Duration]
Безопасное обращение с плутонием и его хранение [Safe Handling and Storage of Plutonium][14]	Как можно скорее после возможного поступления плутония, желательно в течение одного часа [as soon as possible after the suspected intake and preferably within one hour]	Не устанавливается [not established]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]
Общие процедуры медицинского реагирования при ядерной или радиологической аварийной ситуации [Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency, Emergency Preparedness and Response] [9]	Не устанавливается [not established]	Не устанавливается [not established]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]
Медицинское обслуживание лиц, подвергшихся внутреннему загрязнению радионуклидами в условиях ядерной или радиационной аварийной ситуации [Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency] [10]	Как можно скорее после известного или предполагаемого поступления [as soon as possible after known or suspected internal contamination]	Не устанавливается [not established]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]
Отчет НКРЗ № 156 Разработка биокинетической модели для загрязненных радионуклидами ран и методики оценки, дозиметрии и лечения [NCRP REPORT No. 156 Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment] [14]	Как можно скорее [as soon as possible]	Если «сохраненная» доза превышает годовой предел в 1-10 раз [saved doses on the order of 1 to 10 times the annual limit]	Через пять дней лечения по результатам измерений активности плутония в СКМ принять решение о необходимости продолжения лечения; общая продолжительность не устанавливается [by the fifth day, evaluate bioassay data for intake/uptake estimation and decide whether further chelation is necessary; the total duration is not established]

Методический документ [Methodological document]	Рекомендации к выполнению декорпорации [Recommendations for performing decontamination]		
	Принятие первоначального решения [The initial decision]	Уровни вмешательства [Levels of intervention]	Продолжительность [Duration]
Отчет НКРЗ № 161 Контроль лиц, загрязненных радионуклидами: справочник [NCRP REPORT No. 161 Management of persons contaminated with radionuclides: handbook] [11]	Как можно скорее [as soon as possible]	Если поступление превышает Clinical Decision Guide* [if the intake exceeds Clinical Decision Guide]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]
МУ 2.6.1.034-2014 ¹ «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]	1–1,5 часа [within 1–1.5 hour]	ОЭД 5-50 мЗв [expected effective dose 5-50 mSv]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]

* Поступление, удовлетворяющее ограничениям по дозе как для стохастических, так и для детерминированных эффектов [Intake that satisfies dose limitation for both stochastic and deterministic effects].

Ключевые вопросы для разработки тактики декорпорации

Уровни доз или поступления, при которых принимается решение о применении хелата, в рекомендациях МКРЗ и МАГАТЭ не оговариваются [7, 10]. В литературных источниках приводятся рекомендации, основанные на экспертных оценках, опирающихся на концепцию «сохраненной дозы» (“saved dose”) или концепцию риска. В работе R. Wood et al. при подтвержденном поступлении, приводящем к ОЭД в интервале 20–200 мЗв, рекомендовано проведение единичного или непродолжительного введения пентацина, что основано на концепции риска: избыточный риск стохастических эффектов при дозе 20 мЗв составляет 0,15 %, при 200 мЗв – 1,5 % [15]. В руководстве по лечению работников с инкорпорацией радионуклидов, подготовленной Министерством энергетики США (United States Department of Energy, DOE), при дозе 20 мЗв рекомендовано применение ДТПА, при уровне 200 мЗв лечение является строго обязательным [16]. В работе Toohey et al., на основании критерия для проведения медицинских мер публикации 156 НКРЗ США при поступлении через поврежденные кожные покровы, определены значения DRG (Derived Regulatory Guidance) – активности в ране, которая может привести к дозе 20 или 50 мЗв [12, 17]. Критерием для проведения медицинских мер служит концепция “saved dose” (снижение дозы за счет лечения): если сохраненная доза превышает годовой предел в 1–10 раз – рекомендована хелатотерапия, если более чем в 10 раз – хирургическое вмешательство и хелатотерапия [12]. В публикации 161 НКРЗ США рекомендуемой величиной для принятия клинического решения является поступление CDG (Clinical Decision Guide),

приводящее к ожидаемой эффективной дозе (ОЭД) в 0,25 Зв (250 мЗв). Для персонала при поступлении, эквивалентном величине CDG, рекомендуется хелатотерапия, и при поступлении, превышающем CDG в два раза выполнение хелатотерапии обязательно. CDG для ингаляционного поступления ^{239}Pu – $7,6 \times 10^3$ Бк (тип П) и $3,0 \times 10^4$ Бк (тип S) [11]. В руководстве, разработанном для персонала дозиметрической поддержки Хэнфорда, рекомендуемой величиной для обязательного выполнения хелатотерапии является ОЭД 200 мЗв [18]. В МУ 2.6.1.034-2014¹ при ингаляционном поступлении введение пентацина рекомендовано при значениях предварительной оценки ОЭД от 5 мЗв, при раневом поступлении – при суммарной активности радионуклидов в ране работника 40 Бк.

Рекомендуемым способом введения препарата является внутривенный, при ингаляционном поступлении вместе с внутривенным введением рекомендованы ингаляции пентацином. Ингаляции наиболее эффективны в ранние сроки после поступления, так как процессы фиксации радионуклида в легких происходят довольно быстро. Наиболее подробно рекомендации по выполнению ингаляций пентацином приведены в МУ 2.6.1.034-2014¹:

- при значениях предварительной оценки ОЭД от 5 до 50 мЗв сразу после госпитализации работника рекомендованы ингаляция раствора пентацина (при условии, что она не была проведена в здравпункте) и далее один раз в сутки (не менее 3 процедур) и внутривенное введение пентацина (при условии, что инъекция не была проведена в здравпункте). Повторное введение пентацина проводится через 12 ч после выявления инцидента и в дальнейшем – один раз в сутки при учете результатов биофизического обследования;

– при значениях предварительной оценки ОЭД от 50 до 200 мЗв сразу после госпитализации работника рекомендованы ингаляция раствора пентацина (при условии, что она не была проведена в здравпункте) и далее один раз в сутки (не менее 7 процедур) и внутривенное введение пентацина (при условии, что инъекция не была проведена в здравпункте). Повторное введение пентацина проводится через 12 ч после выявления инцидента и в дальнейшем – один раз в сутки при учете результатов биофизического обследования;

– при значениях предварительной оценки ОЭД от 200 мЗв сразу после госпитализации работника рекомендованы ингаляция раствора пентацина (при условии, что она не была проведена в здравпункте) и через 6 ч после выявления инцидента при условии, что она была проведена, и далее – один раз в сутки (не менее 10 процедур) и внутривенное введение пентацина (при условии, что инъекция не была проведена в здравпункте). Повторное введение пентацина проводится через 12 ч после выявления инцидента и в дальнейшем – один раз в сутки при учете результатов биофизического обследования.

Кратность введения препарата в методических документах не устанавливается, в МУ 2.6.1.034-2014¹ рекомендовано определять тактику и объем медицинской помощи в зависимости от результатов предварительных оценок величины внутреннего поступления радионуклидов и ОЭД.

И последним, немаловажным аспектом для определения тактики декорпорации, является вопрос, когда же следует прекращать применение ДТПА и каким критерием при этом следует руководствоваться. В методической документации и доступных литературных источниках не приводится однозначного ответа. В публикации 156 НКРЗ США рекомендуется через пять дней лечения оценить содержание в организме на основе измерений активности ²³⁹Pu в суточной порции мочи и принять решение о необходимости продолжения лечения [12]. В работе G.N. Stradling et al. предлагается прекращать терапию: 1) в случае, когда очевидно, что экскреция радионуклида незначительна в сравнении с начальным отложением; или 2) в случае, когда ОЭД снижена до приемлемых уровней [19]. В работе Л.А. Плотниковой с соавт. показана целесообразность проведения курса,ключающего не более 20 инъекций ДТПА [20].

Следует также обратить внимание на вопрос об отложенном начале декорпорации, так как выявление случаев повышенного поступления радионуклидов может происходить не сразу, а через некоторое, даже значительное время [21]. В Публикации №156 НКРЗ США отмечено, что хотя рекомендуется начинать лечение в течение нескольких часов после радиационного инцидента, применение ДТПА позволяет снизить дозы, даже если лечение было начато спустя несколько недель [12]. Зависимость эффективности применения хелата от времени начала декорпорации доказана как в экспериментальных исследованиях на животных [22–24], так и при применении пентацина для декорпорации в случаях острого поступления у работников радиационно-опасных производств [21, 25]. Доказано, что чем раньше применяется хелат, тем выше его эффективность. Отложенное применение хелата менее эффективно, тем не менее показано, что для ингаляционного поступления америция и отложенной хелатотерапии (через несколько месяцев после поступления) можно достичь снижения ОЭД на 40 % [26].

Заключение

Изучение отечественных и зарубежных документов, содержащих положения и рекомендации для выполнения декорпорации плутония и америция хелатными комплексами, показало, что в них не сформулированы необходимые требования к порядку выполнения декорпорации. Не регламентированы основные положения, такие как принятие первоначального решения о необходимости начала декорпорации, критерий принятия решения, кратность введения препарата и продолжительность курса.

Пока не установлены единые критерии для принятия решения о начале декорпорационной терапии, следует руководствоваться принципом оперативности и начинать декорпорацию в кратчайшие сроки после предполагаемого или известного поступления. В реальных условиях достоверная оценка величины поступления и дозы внутреннего облучения с приемлемой неопределенностью не может быть получена немедленно после произошедшей аварии, а недостаток информации о физико-химических свойствах поступившего соединения может вносить значительную неопределенность при получении первичных оценок. Поэтому дальнейшая тактика декорпорации, включая кратность введения препарата и его дозировку, должна определяться по мере поступления информации об оценках дозиметрических величин, на основании результатов дозиметрического обследования и с учетом состояния здоровья пострадавшего работника. В качестве критерии для прекращения декорпорации можно рассматривать как снижение дозы до приемлемых уровней, так и объективные свидетельства о прекращении ускорения выведения актинидов с мочой – результаты биофизического обследования.

Несмотря на снижение эффективности хелатов при отложенном начале декорпорации, не следует отказываться от проведения курса декорпорации, так как применение ДТПА позволяет снизить дозу внутреннего облучения даже спустя несколько недель и месяцев.

Благодарности

Автор благодарит рецензентов за тщательный анализ статьи.

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет 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. Rump A., Stricklin D., Lamkowsski A. et al. Reconsidering current decorporation strategies after incorporation of radionuclides // Health Physics. 2016. Vol. 111, No 2. P. 204-211.
2. Singh V.K., Romaine P.L.P., Seed T.M. Medical countermeasures for radiation exposure and related injuries: characterization of medicines, FDA-approval status and inclusion into the strategic national stockpile // Health Physics. 2015. Vol. 108, No 6. P. 607-630.

3. Menetrier F., Grappin L., Raynaud P. et al. Treatment of accidental intakes of plutonium and americium: Guidance notes // Applied Radiation and Isotopes. 2005. Vol. 62, No 6. P. 829–846.
4. Li C., Kenbayeva Z., Dainiak N. et al. Development of Evidence-based Guidelines on Assessment and Management of Internal Contamination with Transuranic Actinides // Disaster Medicine and Public Health Preparedness. 2025. Vol. 19. P. 156.
5. Reis A., Sampaio C., Sousa W. et al. Key topics for making decisions on decontamination therapies // Radiation Protection Dosimetry. 2024. Vol. 200, No 7. P. 707–714.
6. Grappin L., Berard P., Menetrier F. et al. Treatment of actinide exposure: a review of Ca-DTPA injections inside CEA-COGEMA plants // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 435–439.
7. ICRP. Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack. ICRP Publication 96 // Annals of the ICRP. 2005. Vol. 35, No 1.
8. Ковтун В.Ю., Гладких В.Д., Давидович Ю.А. и др. К вопросу об использовании лекарственных форм пентацина и цинкцина // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. Т. 60, № 1. С. 45–53.
9. МАГАТЭ. Аварийная готовность и реагирование. Общие процедуры медицинского реагирования при ядерной или радиологической аварийной ситуации. Вена, 2009. 343 с.
10. IAEA Series EPR-Internal Contamination. Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency. IAEA: Vienna, 2018. 116 p.
11. NCRP REPORT No. 161. Management of persons contaminated with radionuclides. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda (MD), 2008. 411 p.
12. NCRP REPORT No. 156. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda (MD), 2006. 286 p.
13. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2–4.
14. МАГАТЭ. Серия по Безопасности № 9. Безопасное обращение с плутонием и его хранение. Международное агентство по атомной энергии. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2000. 123 с.
15. Wood R., Sharp C., Gourmelon P. et al. Decontamination treatment – medical overview // Radiation Protection Dosimetry. 2000. Vol. 87, No 1. P. 51–57.
16. Gerber G.B., Thomas R.G. Guidebook for the Treatment of Accidental Internal Radionuclide Contamination of Workers (joint publication for the Commission of the European Communities Directorate-General for Science, Research and Development, Radiation Protection Program, and the US Department of Energy) // Radiation Protection Dosimetry. 1992. Vol. 41, No 1. P. 27–36.
17. Toohey R.E., Bertelli L., Sugarman S. L. et al. Dose coefficients for intakes of radionuclides via contaminated wounds // Health Physics. 2011. Vol. 100, No 5. P. 508–514.
18. Carbaugh E.H., Decker W.A., Swint M.J. Medical and health physics management of a plutonium wound // Radiation Protection Dosimetry. 1989. Vol. 26, No 1. P. 345–349.
19. Stradling G.N., Taylor D. M., Henge-Napoli M-H. et al. Treatment for actinide-bearing industrial dusts and aerosols // Radiation Protection Dosimetry. 2000. Vol. 87, No 1. P. 41–50.
20. Плотникова Л.А., Байсоголов Г.Д. Влияние пентацина и тетоксацина на ускорение выведения плутония из организма человека (Сообщение II) // Бюллетень радиационной медицины. 1963. № 1-а. С. 83–86.
21. Соколова А.Б., Ефимов А.В. Декорпорация плутония: эффективность отложенной хелатотерапии в случаях острого поступления через поврежденные покровы кожи у работников ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 2. С. 70–80.
22. Foreman H. The Effect of Diethylenetriaminepentaacetic Acid (DTPA) on Acceleration of Excretion of Actinide Elements // Health Physics. 1962. Vol. 8, No 6. P. 735–737.
23. Любчанский Э.Р. Применение Na₂CaDTPA (пентацина) для удаления Pu²³⁹ из организма крыс при ингаляционном поражении // Медицинская радиология. 1965. № 1. С. 45–49.
24. Ballou J.E., Lloyd G.E., McDonald K.E., Buschbom R.L. Influence of inhaled Ca-DTPA on the long-term effects of inhaled Pu nitrate // Health Physics. 1977. Vol. 32 (June). P. 479–487.
25. Соколова А.Б., Ефимов А.В. Эффективность неотложной хелатотерапии для работников ПО «Маяк» в случае поступления актинидов через поврежденные покровы кожи // Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 3. С. 74–82.
26. Roedler H.D., Nobke D., Ohlenschlager L. et al. Incorporation of ²⁴¹Am: effectiveness of late DTPA chelation therapy // Radiation Protection Dosimetry. 1989. Vol. 26, No 1/4. P. 377–379.

Поступила: 18.09.2025

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

Для цитирования: Соколова А.Б. Ключевые аспекты декорпорации плутония и америция в случаях их аварийного поступления персоналу радиационно опасных производств // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 113–120. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-113-120

Key aspects of decorporation of plutonium and americium in cases of emergency intake by personnel of radiation hazardous production facilities

Alexandra B. Sokolova

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

In conditions of plutonium processing production, despite the achieved improvement of the radiation situation in the workplace, the probability of emergency situations leading to acute inhalation of radionuclides or their entry through damaged skin cannot be ruled out. In such cases, chelates are used to prevent radiation injuries or reduce the risk of their occurrence. The aim of this study was to examine domestic and foreign methodological documents and to determine the degree of completeness and sufficiency of the recommendations contained therein for the decorporation of plutonium and americium with chelate. General recommendations for the use of chelate complexes presented in Publication No. 96 of the International Commission on Radiological Protection, documents of the International Atomic Energy Agency, as well as documents of the National Council on Radiation Protection and Measurements of the United States, and domestic 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" were reviewed. Uniform requirements for the procedure for performing decorporation in terms of the frequency of drug administration and the duration of the decorporation course are not established by these documents; also, a uniform approach to determining the criterion for making a decision on the use of a chelate and the end of the decorporation course has not been developed. At present, until uniform criteria for making a decision on the initiation of decorporation therapy have been established, it is proposed to be guided by the principle of promptness and to begin decorporation as soon as possible after the expected or known intake. Then, decorporation tactics should be determined as information on dosimetric assessments becomes available, taking into account the health status of the affected worker, without excluding the possibility of delayed use of the chelate.

Key words: plutonium, americium, decorporation, chelate, pentacine.

Acknowledgments

The author would like to thank the reviewers for their thorough analysis of the article.

Conflict of interests

The author declares 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. Rump A, Stricklin D, Lamkowsski A, Eder S, Abend M, Port M. Reconsidering current decorporation strategies after incorporation of radionuclides. *Health Physics*. 2016;111(2): 204-211.
2. Singh VK, Romaine PLP, Seed TM. Medical countermeasures for radiation exposure and related injuries: characterization of medicines, FDA-approval status and inclusion into the strategic national stockpile. *Health Physics*. 2015;108(6): 607-630.
3. Ménétrier F, Grappin L, Raynaud P, Courtay C, Wood R, Joussineau S. Treatment of accidental intakes of plutonium and americium: Guidance notes. *Applied Radiation and Isotopes*. 2005;62(6): 829–846.
4. Li C, Kenbayeva Z, Dainiak N, Yepes-Nunez JJ, Zeeb H, Gill S. Development of Evidence-based Guidelines on Assessment and Management of Internal Contamination with Transuranic Actinides. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*. 2025;19: 156. DOI 10.1017/dmp.2025.10091.
5. Reis A, Sampaio C, Sousa W, Aguiar L, Bertelli L. Key topics for making decisions on decapsulation therapies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2024;200(7): 707-714. DOI 10.1093/rpd/ncae097.
6. Grappin L, Berard P, Menetrier F, Carbone L, Courtay C, Castagnet X. Treatment of actinide exposure: a review of Ca-DTPA injections inside CEA-COGEMA plants. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127(1-4): 435-439.
7. ICRP. Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack. ICRP Publication 96. *Annals of the ICRP*. 2005;35(1).
8. Kovtun VYu, Gladkikh VD, Davidovich YuA, Zhorova ES, Ogorodnikova VV, Belyaev IK, et al. On the use of dosage forms of pentacin and zincacine. *Meditinskaya radiobiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2015;60(1): 45-53 (In Russian).
9. IAEA. Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency, Emergency Preparedness and Response. EPR-MEDICAL. Vienna; 2005.
10. IAEA. Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency. Series EPR-Internal Contamination. Vienna; 2018.
11. NCRP REPORT No. 161. Management of persons contaminated with radionuclides. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda (MD); 2008.

Alexandra B. Sokolova

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

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

12. NCRP REPORT No. 156. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda (MD); 2006.
13. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4).
14. IAEA. Safe Handling and Storage of Plutonium. Safety Reports Series No. 9. Vienna; 1998.
15. Wood R, Sharp C, Gourmelon P, Le Guen B, Stradling GN, Taylor DM, et al. Decorporation treatment – medical overview. *Radiation Protection Dosimetry*. 2000;87(1): 51-57.
16. Gerber GB, Thomas RG. Guidebook for the Treatment of Accidental Internal Radionuclide Contamination of Workers (joint publication for the Commission of the European Communities Directorate-General for Science, Research and Development, Radiation Protection Program, and the US Department of Energy). *Radiation Protection Dosimetry*. 1992;41(1): 27-36.
17. Toohey RE, Bertelli L, Sugarman SL, Wiley AL, Christensen DM. Dose coefficients for intakes of radionuclides via contaminated wounds. *Health Physics*. 2011;100(5): 508-514.
18. Carbaugh EH, Decker WA, Swint MJ. Medical and health physics management of a plutonium wound. *Radiation Protection Dosimetry*. 1989;26(1): 345-349.
19. Stradling GN, Taylor DM, Henge-Napoli M-H, Wood R, Silk TJ. Treatment for actinide-bearing industrial dusts and aerosols. *Radiation Protection Dosimetry*. 2000;87(1): 41-50.
20. Plotnikova LA, Baysogolov GD. The effect of pentacin and toxacin on the acceleration of plutonium elimination from the human body (Communication II). *Byulleten' radiatsionnoy meditsiny = Bulletin of Radiation Medicine*. 1963;1-a: 83-86 (In Russian).
21. Sokolova AB, Efimov AV. Plutonium decorporation: the effectiveness of delayed chelation therapy in cases of acute intake through damaged skin in workers of the Mayak Production Association. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2021;2: 70-80 (In Russian).
22. Foreman H. The Effect of Diethylenetriaminepentaacetic Acid (DTPA) on Acceleration of Excretion of Actinide Elements. *Health Physics*. 1962;8(6): 735-737.
23. Lyubchansky ER. Use of Na_3CaDTPA (pentacin) to remove Pu^{239} from the body of rats with inhalation damage. *Meditsinskaya radiologiya = Medical Radiology*. 1965;1: 45-49 (In Russian).
24. Ballou JE, Lloyd GE, McDonald KE, Buschbom RL. Influence of inhaled Ca-DTPA on the long-term effects of inhaled Pu nitrate. *Health Physics*. 1977;32(June): 479-487.
25. Sokolova AB, Efimov AV. Effectiveness of emergency chelation therapy for the Mayak PA personnel in case of actinide intake via damaged skin. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2019;3: 74-82 (In Russian).
26. Roedler HD, Nobke D, Ohlenschlager L, Schieferdecker H, Doerfel H, Renz K. Incorporation of ^{241}Am : effectiveness of late DTPA chelation therapy. *Radiation Protection Dosimetry*. 1989;26(1/4): 377-379.

Received: September 18, 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, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: sokolova@subi.su)
ORCID: 0000-0002-6036-4178

For citation: Sokolova A.B. Key aspects of decorporation of plutonium and americium in cases of emergency intake by personnel of radiation hazardous production facilities. *Radiatsionnaya Gygiene = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 113–120. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-113-120

Техногенное производственное облучение персонала радиационных объектов в 2024 году

**Барковский А.Н.¹, Ахматдинов Р.Р.¹, Сивенков А.Г.², Цовьянов А.Г.², Журавлева В.Г.²,
Кувшинников С.И.³, Тутельян О.Е.³**

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

² Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Федеральное медико-биологическое агентство, Москва, Россия

³ Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Целью настоящего исследования был анализ доз облучения персонала радиационных объектов Российской Федерации в 2024 г. и за период с 2019 по 2024 год. Использованы данные о дозах облучения в 2024 г. 239 743 человек персонала группы А и 22 490 человек персонала группы Б, работающих на 20359 радиационных объектах, из которых 15 883 (78 %) являются медицинскими учреждениями. Средняя годовая эффективная доза техногенного производственного облучения персонала группы А в 2024 году составила 1,08 мЗв, а персонала группы Б - 0,58 мЗв. Средние дозы достаточно стабильны и за период 2019–2024 гг. находились в диапазоне от 1,08 до 1,19 мЗв для персонала группы А и от 0,58 до 0,66 мЗв для персонала группы Б. Годовую индивидуальную дозу техногенного производственного облучения более 2 мЗв получили около 10 % персонала группы А и около 2 % персонала группы Б. В 2024 году зарегистрировано 4 случая превышения годовой индивидуальной дозы 50 мЗв для персонала группы А. За последние 6 лет количество превышений среднегодового предела дозы для персонала группы Б (91) почти вдвое больше аналогичной величины для персонала группы А (50), хотя количество персонала группы Б, для которого проводится индивидуальный дозиметрический контроль, значительно меньше численности персонала группы А. В основном, это имеет место для персонала группы Б медучреждений, участвующего при проведении операций под рентгеновским контролем. Необходимо сделать индивидуальный дозиметрический контроль обязательным для данной категории персонала группы Б. В целом, в Российской Федерации обеспечивается социально приемлемый уровень радиационной безопасности персонала радиационных объектов.

Ключевые слова: годовые индивидуальные дозы, техногенное производственное облучение персонала, Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз граждан.

Введение

Техногенное производственное облучение персонала за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов (РО), является наиболее жестко регулируемым видом облучения. Благодаря этому данный вид облучения вносит всего около 0,05 % в коллективную дозу облучения населения Российской Федерации [1]. Тем не менее, именно этот вид облучения вызывает наибольшую тревожность у населения, порой переходящую в радиофобию. Единственное действенное средство борьбы с этим – максимальная гласность в этом вопросе, основными инструментами реализации которой являются радиационно-гигиеническая паспортизация и Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД).

Для персонала группы А установлен двухступенчатый предел дозы: первая «ступень» ограничивает годовую эффективную дозу в отдельные годы до 50 мЗв, а вторая – среднее значение данной величины за любые 5 последовательных лет до 20 мЗв. Для персонала группы Б система ограничения доз облучения такая же, но нормативные значения в 4 раза меньше¹. Это позволяет в случае превышения среднегодового предела дозы за какой-либо год своевременно принять меры для недопущения превышения среднегодового предела дозы в среднем за 5 лет. При соблюдении предела дозы эффективная доза техногенного производственного облучения персонала группы А за 50 лет производственной деятельности не превысит 1 Зв, а для персонала группы Б – 0,25 Зв. Инструментом обеспечения постоянного надзора за своевременным принятием администрацией радиационного объекта соответствующих решений

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09, утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47, зарегистрировано Министерством России 14.08.2009, регистрационный № 14534. [Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. (In Russ.)]

Барковский Анатолий Николаевич

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

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

в подобных случаях является региональный банк данных по индивидуальным дозам облучения персонала радиационных объектов, расположенных на территории субъекта Российской Федерации (РБД ДОП). В него ежегодно стекаются все годовые индивидуальные дозы техногенного производственного облучения персонала РО. При этом имеется возможность оценить и суммарные дозы персонала, работающего по совместительству на нескольких РО. Данные РБД ДОП ежегодно стекаются в федеральный банк данных ФБД ДОП, состоящий из двух частей: ФБД ДОП Роспотребнадзора, в который поступают данные от РО, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, и ФБД ДОП ФМБА России, в который поступают данные РО, обслуживаемых ФМБА России. Это позволяет ежегодно анализировать состояние радиационной безопасности персонала РО и динамику индивидуальных доз их облучения.

Цель исследования – проведение анализа доз облучения персонала РО, расположенных на территории Российской Федерации, в 2024 году и за период с 2019 по 2024 год.

Материалы и методы

В настоящей статье представлены результаты анализа годовых эффективных доз техногенного производственного облучения персонала РО за счет их нормальной эксплуатации в 2024 году и за период с 2019 по 2024 год. Для этого использовались данные, поступившие в ФБД ДОП Роспотребнадзора и ФБД ДОП ФМБА России, функционирующие

в рамках ЕСКИД. ФБД ДОП Роспотребнадзора создан на базе ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора, а ФБД ДОП ФМБА России – на базе ГНЦРФ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. При проведении анализа использовались также данные, опубликованные в приложениях к радиационно-гигиеническим паспортам Российской Федерации [1–6], представленные Министерством обороны Российской Федерации (МО), Министерством внутренних дел Российской Федерации (МВД), Федеральной службой безопасности Российской Федерации (ФСБ), Управлением делами Президента Российской Федерации (УДП), Федеральной службой исполнения наказаний Российской Федерации (ФСИН) и Федеральной службой Войск национальной гвардии Российской Федерации (ВНГ).

Результаты и обсуждение

В 2024 году в Российской Федерации 21 454 РО, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, и 660 РО, обслуживаемых ФМБА России, представили данные по индивидуальным дозам техногенного производственного облучения персонала в ФБД ДОП.

На рисунке 1 представлена информация о динамике количества РО, осуществлявших обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения (ИИИ) на территории Российской Федерации и представивших в ФБД ДОП информацию об индивидуальных дозах техногенного производственного облучения персонала [7–12].

Количество радиационных объектов, шт.
[Number of radiation facilities, pcs.]

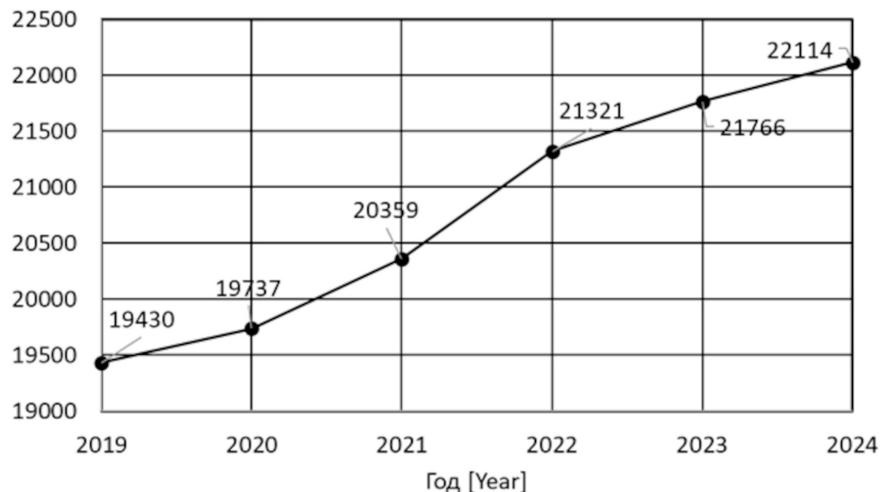


Рис. 1. Динамика количества радиационных объектов, представивших в информацию в ФБД ДОП
[Fig. 1. Dynamics of number of radiation facilities submitted information in the Federal Data base]

Как видно из представленных результатов, как и ранее [13–16], наблюдается постоянный рост количества РО, представляющих данные в ФБД ДОП, и за период с 2019 года по 2024 год их количество выросло на 14 % с 19 430 до 22 114. При этом за последние 2 года этот рост несколько замедлился. За период с 2019 по 2022 год увеличение количества РО составило в среднем 3,2 % в год, а за период с 2022 по 2024 год – 1,9 % в год.

Кроме того, в 2024 году в Российской Федерации функционировали 855 РО в системе МО, 232 РО – в системе МВД, 265 РО – в системе ФСИН и 30 РО – в системе УДП. Данные по количеству РО, функционировавших в 2024 году в системе ФСБ и ВНГ, не представлялись. Данные по дозам облучения персонала в ФБД ДОП этими ведомствами не представлялись. МО представлялись лишь обобщенные данные по персоналу, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Численность и средние дозы персонала РО, надзор за которыми осуществляют службы санэпиднадзора МО, МВД, ФСБ, ФСИН, ВНГ и УДП

[Table 1]

The number and average doses of RF personnel supervised by the sanitary and epidemiological services of the MD, the MIA, the FSS, the FPS, the FSNGT and the OPA]

Год [Year]	МО [MD]	МВД [MIA]	ФСБ [FSS]	ФСИН [FPS]	ВНГ [FSNGT]	УДП [OPA]	ВСЕГО [Total]
Численность персонала группы А [Number of Group A personnel]							
2019	14 238	1 060	1 391	1 364	179	697	4 691
2020	14 420	1 133	1 326	1 385	196	660	4 700
2021	13 989	1 154	1 391	1 608	181	660	4 994
2022	13 491	1 221	–	1 302	–	679	3 202
2023	13 811	1 255	–	1 778	–	689	3 722
2024	13 718	1 233	–	2 245	–	729	4 207
Численность персонала группы Б [Number of Group B personnel]							
2019	3 905	96	203	9	8	115	431
2020	4 073	137	167	5	9	111	429
2021	3 760	116	203	10	3	132	464
2022	3 756	136	–	10	–	123	269
2023	5 156	166	–	15	–	132	313
2024	4 895	151	–	20	–	148	319
Средние годовые индивидуальные дозы персонала группы А, мЗв [Average annual individual doses of Group A personnel, mSv]							
2019	1,29	0,74	0,79	0,71	1,10	1,35	–
2020	0,89	0,76	1,01	0,74	1,08	1,46	–
2021	0,82	0,88	0,79	0,69	1,32	1,42	–
2022	0,86	0,87	–	0,72	–	1,54	–
2023	0,62	0,85	–	0,76	–	1,55	–
2024	0,83*	0,87	–	0,64	–	1,54	–
Средние годовые индивидуальные дозы персонала группы Б, мЗв [Average annual individual doses of Group B personnel, mSv]							
2019	–	0,65	0,30	0,21	–	1,49	–
2020	–	0,70	0,93	0,74	–	1,48	–
2021	–	0,65	0,30	0,34	–	1,35	–
2022	–	0,66	–	0,65	–	1,60	–
2023	–	0,61	–	0,53	–	1,70	–
2024	–	0,67	–	0,60	–	1,50	–

РО – радиационный объект [RF - Radiation facility].

МО – Министерство обороны Российской Федерации [MD – Ministry of Defense].

МВД – Министерство внутренних дел Российской Федерации [MIA – Ministry of Internal Affairs].

ФСБ – Федеральная служба безопасности Российской Федерации [FSS – Federal Security Service].

ФСИН – Федеральная служба исполнения наказаний Российской Федерации [FPS – Federal Penitentiary Service].

ВНГ – Федеральная служба Войск национальной гвардии Российской Федерации [FSNGT – Federal Service of the National Guard Troops].

УДП – Управление делами Президента Российской Федерации [OPA – Office of Presidential Affairs].

Как видно, количество РО достаточно стабильно с небольшими колебаниями. Средние дозы персонала не превышают 2 мЗв/год. В большинстве случаев, дозы персонала группы А и группы Б мало отличаются и примерно соответствуют годовым дозам природного облучения. То есть облучение большей части персонала группы А и группы Б практически полностью определяется природным облучением, а различие между ведом-

ствами, скорее всего, определяется спецификой используемых дозиметров.

Следует отметить, что 75,5 % функционирующих в 2024 году РО являются медучреждениями. При этом по ведомствам процент медучреждений существенно отличается. На рисунке 2 представлены данные по проценту медучреждений в составе РО различных ведомств в 2024 году.

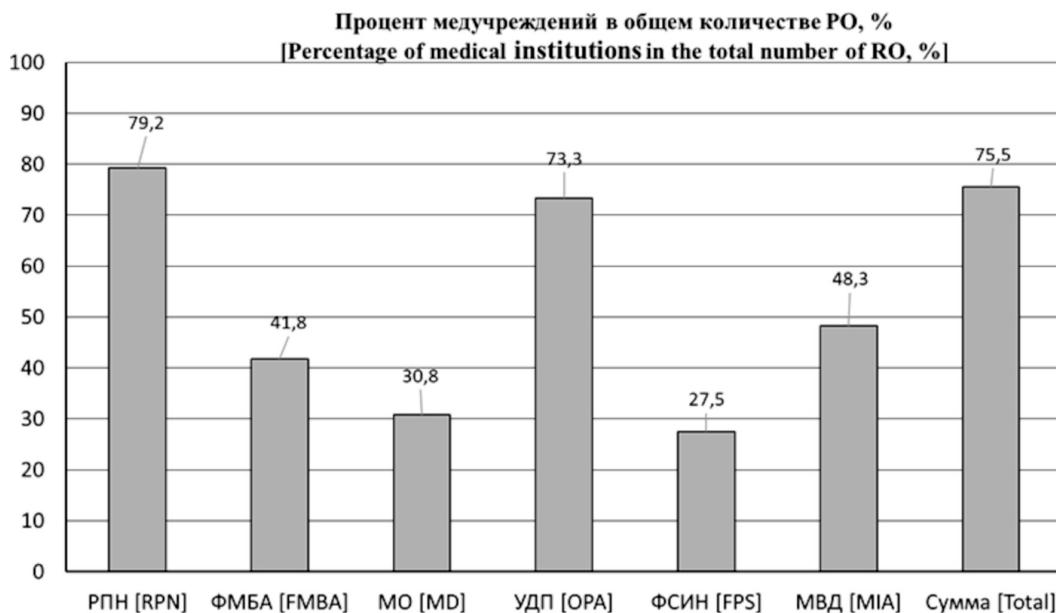


Рис. 2. Процент медучреждений в составе РО различных ведомств в 2024 году

[Fig. 2. Percentage of medical institutions in the RF of various departments in 2024]

Как видно, наибольший процент имеет место для РО, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор (РПН) и УДП, а наименьший - для ФСИН.

РО, надзор за которыми осуществляется Роспотребнадзор, в 2024 году представили в ФБД ДОП данные на 172 669 человек персонала группы А и 14 766 человек персонала группы Б. Еще 88 135 человек персонала группы А и 11 383 человека персонала группы Б представили в ФБД ДОП РО, обслуживаемые ФМБА России. Следует отметить, что индивидуальный дозиметрический контроль не является обязательным для персонала группы Б,

поэтому численность персонала группы Б на РО значительно превышает количество индивидуальных доз, представленных в ФБД ДОП для этой группы персонала. Так, на РО, обслуживаемых ФМБА в 2024 году, работало 88 135 человек персонала группы Б, а данные в ФБД ДОП представлены только на 11 383 человека (12,9 %), для которых проводился индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК). На рисунке 3 представлены данные по численности персонала РО, данные о котором были представлены в ФБД ДОП, с 2019 по 2024 год.

Численность персонала радиационных объектов, чел.
[Number of personnel of radiation facilities, people]

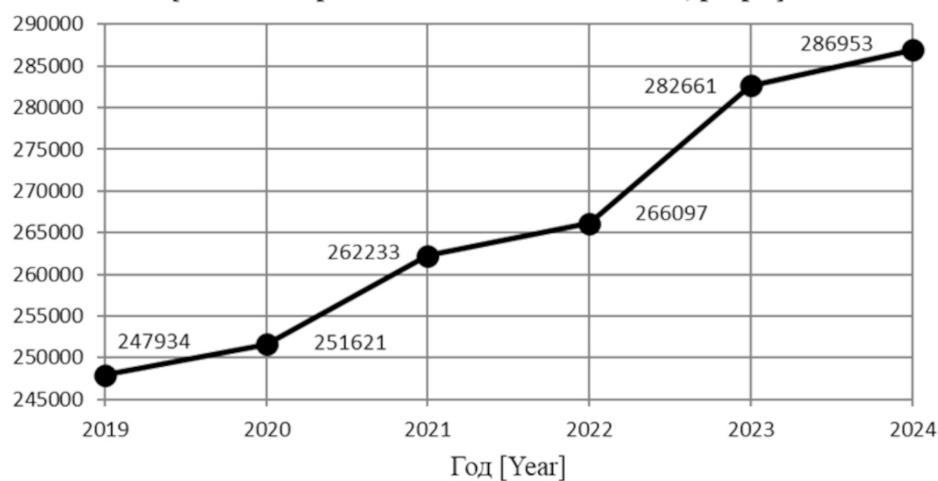


Рис. 3. Численность персонала РО с 2019 г. по 2024 г. по данным ФБД, ДОП

[Fig. 3. The number of RF staff from 2019 to 2024 according to the Federal Data Base]

И в этом случае, как и ранее [13–16], наблюдается постоянный рост численности персонала, составляющий 15,7 % с 2019 по 2024 год.

По состоянию на 2024 год 43,5 % персонала группы А, данные о котором имеются в ФБД ДОП, составляли женщины и 56,5 % – мужчины. Средняя годовая индивидуальная доза техногенного производственного облучения у женщин в 2024 году заметно меньше, чем у мужчин: 0,89 мЗв и 1,15 мЗв соответственно.

Анализ индивидуальных доз персонала РО показывает, что абсолютное большинство имеет индивидуальные годовые дозы значительно меньше среднегодового предела дозы. Средняя доза персонала группы А в 2024 году составила 1,08 мЗв, а персонала группы Б – 0,58 мЗв.

На рисунке 4 приведена динамика средних по Российской Федерации годовых индивидуальных доз техногенного производственного облучения персонала группы А и группы Б за период с 2019 по 2024 год.



Рис. 4. Средние по Российской Федерации годовые индивидуальные дозы техногенного производственного облучения персонала группы А и группы Б

[Fig. 4. Average annual doses of technogenic industrial irradiation of group A and Group B personnel in the Russian Federation]

В таблице 2 представлена усредненная по всем полученным данным структура индивидуальных годовых доз

техногенного производственного облучения персонала группы А и группы Б за период с 2019 по 2024 год.

Структура индивидуальных годовых доз техногенного производственного облучения персонала группы А и персонала группы Б за период с 2019 г. по 2024 г., %

Таблица 2

[Table 2

Structure of individual annual doses of technogenic industrial irradiation to Group A and Group B personnel for the period from 2019 to 2024, %]

Годы [Years]	Диапазон годовых индивидуальных доз, мЗв/год [Range of annual individual doses, mSv/year]						
	0-1	1-2	2-5	5-12,5	12,5-20	20-50	>50
Персонал группы А [Group A personnel]							
2019	61,8	26,9	8,18	2,62	0,51	0	0
2020	63,5	26,7	7,12	2,30	0,36	0	0
2021	63,4	26,7	7,29	2,31	0,32	0	0
2022	65,1	25,6	6,79	2,15	0,39	0	0
2023	64,7	26,2	6,55	2,19	0,40	0	0
2024	65,0	25,9	6,78	2,00	0,29	0,010	0
Среднее [Average]	63,9	26,3	7,12	2,26	0,38	0,002	0

Окончание таблицы 2

Годы [Years]	Диапазон годовых индивидуальных доз, мЗв/год [Range of annual individual doses, mSv/year]						
	0-1	1-2	2-5	5-12,5	12,5-20	20-50	>50
Персонал группы Б [Group B personnel]							
2019	75,9	21,6	2,44	0,07	0	0	0
2020	77,6	20,6	1,66	0,08	0	0	0
2021	78,2	20,2	1,50	0,10	0	0	0
2022	77,7	19,2	3,00	0,09	0,01	0	0
2023	79,5	18,8	1,72	0,04	0	0	0
2024	80,2	18,3	1,46	0,04	0	0	0
Среднее [Average]	78,2	19,8	1,96	0,07	0	0	0

Как видно из представленных результатов, индивидуальные дозы 90 % персонала группы А и 98 % персонала группы Б не превышают 2 мЗв/год. Дозы, превышающие 20 мЗв/год имеют 0,002 % персонала группы А, а дозы, превышающие 5 мЗв/год, – 0,07 % персонала группы Б. Процент количества превышений среднегодового предела дозы для персонала группы Б в 35 раз выше, чем для

персонала группы А, что говорит о необходимости учета данного обстоятельства при определении категорий персонала, для которых необходимо проводить ИДК.

На рисунке 5 представлены данные о количестве превышений за год среднегодового предела дозы для персонала РО за период с 2019 по 2024 год.



Рис. 5. Динамика количества превышений среднегодового предела дозы за год для персонала группы А и группы Б за период с 2019 г. по 2024 г.

[**Fig. 5.** Dynamics of the number of exceedances of the average annual dose limit per year for the personnel of Group A and Group B for the period from 2019 to 2024]

Количество превышений среднегодового предела дозы для персонала группы Б (5 мЗв) практически постоянно превышает количество превышений среднегодового предела дозы для персонала группы А (20 мЗв). Исключением является 2024 год, в котором количество превышений для персонала группы А (18) больше, чем для персонала группы Б (11). Суммарное количество превышений за период с 2019 по 2024 год для персонала группы Б (91) почти в 2 раза больше, чем для персонала группы А (50). С учетом того, что ИДК проводится для 100 % персонала группы А и только для 10–15 % персонала группы Б, необходимо уделять больше

внимания этой категории персонала. По-видимому, необходимо установить обязательность проведения ИДК для отдельных категорий персонала группы Б. Особенно это относится к персоналу группы Б операционных бригад, проводящих в медучреждениях операции под рентгеновским контролем.

В таблице 3 представлены численные значения средних и максимальных годовых эффективных доз техногенного производственного облучения персонала различных видов организаций, осуществляющих обращение с техногенными ИИИ за 2024 год.

Таблица 3

Средние и максимальные годовые эффективные дозы техногенного производственного облучения персонала различных организаций

[Table 3]

Average and maximum annual effective doses of technogenic industrial irradiation to personnel of various organizations]

Вид организации [Type of organization]	Дозы персонала группы А, мЗв [Doses of Group A personnel, mSv]		Дозы персонала группы Б, мЗв [Doses of Group B personnel, mSv]	
	Средние [Average]	Максимальные [Maximum]	Средние [Average]	Максимальные [Maximum]
АЭС [APS]	0,97	15,9	–	–
Геологоразведочные и добывающие [Geological exploration and production]	1,76	19,6	0,34	2,76
Медучреждения [Medical institutions]	0,96	1540	0,87	9,95
Промышленные [Industrial]	1,37	51,3	0,38	3,80
Научные и учебные [Scientific and educational]	0,91	19,5	0,19	2,96
Таможенные [Customs]	0,79	3,2	0,52	1,08
Пункты захоронения РАО [Radioactive waste disposal sites]	1,65	32,0	0,37	1,38
Прочие особо радиационно опасные [Other particularly radiation-hazardous]	1,05	18,8	0,12	1,00
Прочие [Other]	1,01	17,8	0,53	5,10
Всего [Total]	1,08	1540	0,58	9,95

Как видно, наибольшие средние значения годовых индивидуальных доз производственного облучения персонала группы А в 2024 году имели место для геологоразведочных и добывающих (1,76 мЗв) и промышленных (1,37 мЗв) организаций, а персонала группы Б – для медучреждений (0,87 мЗв) и прочих (0,53 мЗв) организаций. Наибольшие значения годовых индивидуальных доз производственного облучения персонала группы А в 2024 г. имели место для медучреждений (1540 мЗв), промышленных организаций (51,3 мЗв) и пунктов захоронения РАО (32,0 мЗв), а персонала группы Б – для медучреждений (9,95 мЗв) и прочих организаций (5,1 мЗв). В 2024 г. были зарегистрированы 4 случая превышения предела дозы для персонала группы А. Три из них имели место в ГБУЗ МО «Сергиево-Посадская больница» Московской области (1540 мЗв, 234 мЗв и 60,7 мЗв), и один – в ОАО «ПО «Севмаш» Архангельской области (51,3 мЗв). При этом для двух человек персонала группы А годовая индивидуальная доза техногенного производственного облучения превысила 200 мЗв – уровень облучения, который в соответствии с п. 3.3 НРБ-99/2009 квалифицируется как

потенциально опасный, требующий отправки людей, получивших такие дозы, на медицинское обследование, по результатам которого принимается решение о возможности их дальнейшей работы с ИИИ. Они направлены на медицинское обследование. В предшествующие годы регистрировались по одному случаю превышения предела дозы для персонала группы А в 2021 году и в 2023 году в АО «ПО «Севмаш». Зарегистрирован также один случай превышения предела дозы для персонала группы Б в 2019 году и по три случая в 2022 году и в 2023 году. Таким образом, за период с 2019 по 2024 год количество превышений предела дозы для персонала группы Б (7) также оказалось больше, чем у персонала группы А (6), что также указывает на необходимость проведения ИДК для отдельных групп данной категории персонала.

По-прежнему значительное количество персонала группы А работает по совместительству на нескольких РО. На рисунке 6 представлена динамика количества совместителей из числа персонала группы А за период с 2019 по 2024 год.



Рис. 6. Численность персонала группы А, работающего по совместительству на нескольких РО
[Fig. 6. The number of the Group A staff working part-time in several RF]

Как и ранее [13–16], наблюдается рост числа совместителей за период с 2019 по 2023 год с некоторым замедлением после 2021 года. В 2024 году впервые отмечено снижения количества совместителей среди персонала группы А РО. Но их количество по-прежнему достаточно велико (12 647 чел.), хотя, в соответствии со статьей 282 Трудового кодекса Российской Федерации, «Не допускается работа по совместительству ... на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, если основная работа связана с такими же условиями»².

Заключение

Представленный анализ показывает, что в Российской Федерации обеспечивается социально приемлемый уровень радиационной безопасности персонала РО. Средние годовые индивидуальные дозы персонала на порядок меньше установленных пределов дозы и достаточно стабильны. Лишь около 10 % персонала группы А получают годовую индивидуальную дозу техногенного производственного облучения более 2 мЗв, и менее 3 % – более 5 мЗв. Годовую индивидуальную дозу техногенного производственного облучения более 2 мЗв получают лишь около 2 % персонала группы Б. Тем не менее, имеются отдельные случаи превышения предела дозы, которые наиболее часты для персонала группы Б, хотя ИДК проводится лишь для небольшой части этой категории персонала. За последние 6 лет количество превышений среднегодового предела дозы для персонала группы Б (91) почти вдвое больше аналогичной величины для персонала группы А (50), хотя количество персонала группы Б, для которого проводится индивидуальный дозиметрический контроль, значительно меньше численности персонала группы А. В основном, это работники хирургических бригад, проводящие операции под рентгеновским контролем. Это еще раз подтверждает

необходимость сделать ИДК обязательным для данной категории персонала группы Б.

Среднегодовые пределы дозы в 2024 году были превышены для 18 человек из персонала группы А и 11 человек из персонала группы Б. Для 4 человек из персонала группы А был превышен и предел дозы, при этом годовые индивидуальные дозы двух медработников ГБУЗ МО «Сергиево-Посадская больница» Московской области превысили уровень 200 мЗв, который в соответствии с п. 3.2.3 НРБ-99/2009, квалифицируется как потенциально опасный, требующий отправки людей, получивших такие дозы, на медицинское обследование.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Барковский А.Н. обеспечил анализ и обобщение информационных материалов, написал черновик рукописи и представил окончательный вариант статьи в редакцию журнала.

Ахматдинов Р.Р. обеспечил обобщение информации об индивидуальных дозах персонала предприятий, поднадзорных Роспотребнадзору.

Сивенков А.Г. обеспечил сбор и обобщение информации об индивидуальных дозах персонала предприятий, обслуживаемых ФМБА России.

Цовьянов А.Г. обеспечил анализ информации об индивидуальных дозах персонала предприятий, обслуживаемых ФМБА России.

Журавлева В.Г. обеспечила подготовку рисунков и таблиц.

Кувшинников С.И. обеспечил сбор информации об индивидуальных дозах персонала предприятий, поднадзорных Роспотребнадзору.

Тутельян О.Е. обеспечила обобщение информации об индивидуальных дозах персонала предприятий, поднадзорных Роспотребнадзору.

²Трудовой кодекс Российской Федерации. Принят Государственной Думой 21 декабря 2001 г. Одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 г. [The Labor Code of the Russian Federation. Adopted by the State Duma on December 21, 2001. Approved by the Federation Council on December 26, 2001 (In Russ.)]

Благодарности

Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить качество рукописи.

Информация о конфликте интересов

У авторов нет конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнялась в рамках Государственного контракта с ФМБА России от 02.06.2025 г. 81.001.25.2.

Литература

1. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2024 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2025. (в издании).
2. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2023 год: радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2024. 130 с.
3. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2022 год: радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2023. 130 с.
4. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2021 год: радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2022. 132 с.
5. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 135 с.
6. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2019 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.:

- Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020. 136 с.
7. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб, 2020. 70 с.
 8. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: информационный сборник. СПб, 2021. 80 с.
 9. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году: справочник. СПб, 2022. 76 с.
 10. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2022 году: справочник. СПб, 2023. 69 с.
 11. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2023 году: справочник. СПб, 2024. 71 с.
 12. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2024 году: справочник (в издании).
 13. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М. и др. Облучение персонала и населения зон наблюдения радиационных объектов в 2021 году // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 106-121. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-106-121.
 14. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 103-113. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-103-113.
 15. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2019 г. // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 110-119. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-110-119.
 16. Барковский А.Н., Братилова А.А., Кормановская Т.А. и др. Динамика доз облучения населения Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г. // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 96-122. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-96-122.

Поступила: 17.10.2025

Барковский Анатолий Николаевич – главный научный сотрудник, руководитель Федерального радиологического 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, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

ORCID: 0009-0007-6179-1394

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

Сивенков Александр Геннадьевич – инженер Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

Цовьянов Александр Георгиевич – заведующий лабораторией Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-6994-0701

Журавлева Валентина Егоровна – инженер Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-7197-7036

Кувшинников Сергей Иванович – врач по радиационной гигиене лаборатории радиационного контроля и физических факторов Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Тутельян Ольга Евгеньевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационного контроля и физических факторов отдела лабораторного дела Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Для цитирования: Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Сивенков А.Г., Цовьянов А.Г., Журавлева В.Г., Кувшинников С.И., Тутельян О.Е. Техногенное производственное облучение персонала радиационных объектов в 2024 году // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 121–131. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-121-131

Technogenic industrial exposure of personnel of radiation facilities in 2024

Anatoly N. Barkovsky¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹, Aleksandr G. Sivenkov², Aleksandr G. Tsovyanov², Valentina E. Zhuravleva², Sergey I. Kuvshinnikov³, Olga E. Tutelyan³

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

² State Research Center - A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

³ Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow, Russia

The purpose of this study was to analyze the radiation doses of personnel of radiation facilities in the Russian Federation in 2024 and for the period from 2019 to 2024. Data on radiation doses in 2024 were used for 239,743 personnel of group A and 22,490 personnel of group B working at 20,359 radiation facilities, of which 15,883 (78 %) were medical institutions. The average annual effective dose of technogenic industrial irradiation to Group A personnel in 2024 was 1.08 mSv, and to Group B personnel - 0.58 mSv. The average doses are quite stable for the period 2019–2024: those ranged from 1.08 to 1.19 mSv for the personnel of group A and from 0.58 to 0.66 mSv for the personnel of group B. About 10 % of the personnel of group A and about 2 % of the personnel of group B received annual individual doses of technogenic industrial radiation of more than 2 mSv. Four cases of exceeding the annual individual dose of 50 mSv for the personnel were registered in Group A in 2024. Over the past 6 years, the number of exceedances of the average annual dose limit for Group B personnel (91) has almost doubled the same amount for Group A personnel (50), although the number of group B personnel for whom individual dosimetric monitoring is carried out is significantly less than the number of Group A personnel. This is mainly the case for the personnel of group B medical institutions involved in X-ray-controlled operations. It is necessary to make individual dosimetric monitoring mandatory for this category of Group B personnel. In general, the Russian Federation ensures socially acceptable level of radiation safety for personnel at radiation facilities.

Key words: annual individual doses, technogenic industrial irradiation of personnel, Unified System for Monitoring and Recording Individual Radiation Doses of Citizens.

Authors' personal contribution

Barkovsky A.N. provided an analysis and synthesis of information materials, wrote a draft of the manuscript and submitted the final version of the article to the editorial board of the journal.

Akhmatdinov Ruslan R. provided a synthesis of information on individual doses of personnel of enterprises supervised by Rospotrebnadzor.

Sivenkov A.G. provided a collection and synthesis of information on individual doses of personnel of enterprises serviced by the FMBA of Russia.

Tsovyanov A.G. provided an analysis of information on individual doses of personnel of enterprises serviced by the FMBA of Russia.

Zhuravleva V.G. provided the preparation of figures and tables.

Kuvshinnikov S.I. provided the collection of information on individual doses of personnel of enterprises supervised by Rospotrebnadzor.

Tutelyan O.E. provided a synthesis of information on individual doses of personnel of enterprises supervised by Rospotrebnadzor.

Acknowledgments

The authors are grateful to the reviewers for their constructive comments, that made it possible to improve the quality of the manuscript.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest.

Sources of funding

The work was carried out under a contract with the FMBA of Russia dated 06/02/2025 number 81.001.25.2.

References

- Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, et al. The results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2024. Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2025. (In the edition). (In Russian).

Anatoly N. Barkovsky

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

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

2. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, et al. The results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2023. Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2024. 130 p. (In Russian).
3. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky FN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, et al. The results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2022. Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2023. 130 p. (In Russian).
4. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky FN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, et al. The results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2021. Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2022. 132 p. (In Russian).
5. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky FN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, et al. The results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2020. Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2021. 135 p. (In Russian).
6. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky FN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, et al. The results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2019. Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2020. 136 p. (In Russian).
7. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2019. Saint Petersburg, 2020. 70 p. (In Russian).
8. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2020. Saint Petersburg, 2021. 80 p. (In Russian).
9. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2021. Saint Petersburg, 2022. 76 p. (In Russian).
10. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2022. Saint Petersburg, 2023. 69 p. (In Russian).
11. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2023. Saint Petersburg, 2024. 71 p. (In Russian).
12. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, et al. Guide: Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2024. Saint Petersburg, 2025. 76 p. (In the edition) (In Russian).
13. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Sivenkov AG, Tsovyanyov AG, Zhuravleva VE, et al. Radiation exposure of personnel and public of radiation control areas of radiation hazardous facilities in the Russian Federation in 2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2022;15(4): 106-121. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-106-121.
14. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2021;14(4): 103-113. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-103-113.
15. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Bratilova AA, Zhuravleva VE, et al. The outcomes of functioning of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens based on the 2019 data. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2020;13(4): 110-119. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-110-119.
16. Barkovsky AN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR. Trends in the doses of the population of the Russian Federation in 2003-2018. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2019;12(4): 96-122. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-96-122.

Received: October 17, 2025

For correspondence: Anatoly N. Barkovsky – Head of 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 (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru)

ORCID: 0009-0007-6179-1394

Ruslan R. Akhmatdinov – Junior Research Fellow, Information-analytical Center of the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Aleksandr G. Sivenkov – Engineer, State Research Center - A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

Aleksandr G. Tsovyanyov – Laboratory Head, State Research Center - A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-6994-0701

Valentina E. Zhuravleva – Engineer, State Research Center - A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-7197-7036

Sergey I. Kuvshinnikov – Radiation Control and Physical Factors Laboratory Physicist Expert, Laboratory Studies Department of Federal Hygiene and Epidemiology Center of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow, Russia

Olga E. Tutelyan – Candidate of Medical Sciences, Radiation Control and Physical Factors Laboratory Head, Federal Hygiene and Epidemiology Center Laboratory Studies, Moscow, Russia

For citation: Barkovsky A.N., Akhmatdinov R.R., Sivenkov A.G., Tsovyanyov A.G., Zhuravleva V.E., Kuvshinnikov S.I., Tutelyan O.E. Technogenic industrial exposure of personnel of radiation facilities in 2024. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2025. Vol. 18, No. 4. P. 121–131. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-121-131

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-132-140

УДК: 539.163:614.876(470)

Оценка системы обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками ионизирующего излучения

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

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

В материале приведена оценка современного состояния системы обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при воздействии природных источников ионизирующего излучения. Краткое содержание: В статье выполнен анализ действующей в рамках отечественного санитарного законодательства нормативно-методической базы в части облучения природными источниками. Показано, что в стране более 20 лет функционирует уникальная система сбора, учета и анализа данных об уровнях всех основных параметров природного облучения. В Федеральном банке доз облучения граждан за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона накоплены результаты 2 549 785 измерений МАЭД гамма-излучения в жилых и общественных зданиях, 3 742 296 измерений МАЭД гамма-излучения на открытой местности, 854 525 измерений уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий и 270 026 измерений удельной активности ПРН в питьевой воде, проведенных в период с 2001 по 2024 год. Показано, что средняя индивидуальная годовая эффективная доза природного облучения населения Российской Федерации составляет 3,33 мЗв, из которых 1,97 мЗв – доза за счет изотопов радона и их дочерних продуктов распада. Данные о природном облучении населения России согласуются с новыми среднемировыми данными Научного комитета ООН по действию атомной радиации за 2024 год. В материале также обозначены перспективы развития и модернизации отечественной нормативно-методической базы в части облучения природными источниками. Заключение: Действующая в Российской Федерации система нормативно-методических документов является надежным инструментом обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии всех регулируемых природных источников. Совершенствование нормативной базы с учетом стандартов и рекомендаций международных организаций позволит поднять отечественное санитарное законодательство на уровень современных мировых тенденций, сохранив при этом достигнутые высокие показатели обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками излучения.

Ключевые слова: природные источники ионизирующего излучения, нормативно-методические документы, Единая государственная система контроля и учета доз облучения граждан, федеральный банк данных.

Введение

Важнейшим компонентом воздействия физических факторов ионизирующей природы на организм человека является облучение, обусловленное содержанием природных радионуклидов (ПРИ) рядов ^{238}U и ^{232}Th , а также ^{40}K , в окружающей природной среде (земной коре, воде, воздухе) и антропогенной среде (прежде всего, в строительных материалах и изделиях). Именно природные источники ионизирующего излучения (ПИИИ) вносят основной вклад в облучение населения любой страны мира [1, 2]. В Российской Федерации доля ПИИИ в общем облучении в расчете на 1 жителя страны по данным за 2023 год составила 74,86 % (для отдельных регионов страны – Республика Алтай, Еврейская АО – этот показатель превышает 90 %) [3]. Закономерно, что вопросам обеспечения радиационной безопасности населения при облучении ПИИИ уделяется большое внимание

как в международной практике [4–8], так и в Российской Федерации [9–11].

Цель исследования – дать оценку современного состояния системы обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении ПИИИ.

Задачи исследования

5. Выполнить анализ нормативно-методической базы в части облучения ПИИИ, действующей в рамках отечественного санитарного законодательства; оценить актуальность и достаточность требований радиационной безопасности при воздействии факторов природного облучения на население страны.

6. Дать оценку эффективности действующей в Российской Федерации системы сбора, учета и контроля данных об уровнях всех основных параметров природного облучения населения.

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

7. Оценить объемы проводимых в Российской Федерации исследований факторов природного облучения и дать оценку их достаточности для получения объективных оценок доз облучения населения регионов за счет ПИИИ.

8. Оценить уровни облучения населения субъектов Российской Федерации и страны в целом за счет ПИИИ, сравнить полученные оценки доз с международными данными.

9. Оценить перспективы совершенствования отечественной нормативно-методической базы в части облучения ПИИИ.

Основными факторами природного облучения населения, на которые возможно оказывать регулирующее воздействие со стороны человека (регулируемые ПИИИ), являются:

- внешнее терригенное облучение за счет содержания ПРН в окружающих природных и антропогенных объектах (территории, зданиях, материалах, предметах);
- внутреннее облучение за счет ингаляции радона (²²²Rn), торона (²²⁰Rn) и их короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР);
- внутреннее облучение за счет потребления питьевой воды и продуктов питания, в которых содержатся ПРН.

К факторам природного облучения, на которые фактически невозможно оказывать регулирующее воздействие со стороны человека ни техническими, ни организационными методами (нерегулируемые ПИИИ), относятся:

- внутреннее облучение за счет содержащегося в организме ⁴⁰K;
- внешнее облучение за счет космического излучения на поверхности Земли, параметры которого зависят от характеристик конкретной местности (географической широты и высоты над уровнем моря) и солнечной цикличности;
- внутреннее облучение за счет ингаляционного поступления долгоживущих ПРН, содержащихся в приземном слое атмосферного воздуха, в том числе адсорбированных на пылевых частицах.

Полная доза облучения людей за счет ПИИИ определяется как сумма доз, сформированных за счет каждого из вышеупомянутых компонентов природного облучения (как

регулируемых, так и нерегулируемых). В международной и отечественной практике регулирования и нормирования воздействия факторов природного облучения населения регламентируются только регулируемые ПИИИ.

Нормативно-методические документы Российской Федерации в части облучения ПИИИ

Ни в Российской Федерации, равно как ни в одной другой стране мира, не установлен предел дозы облучения населения за счет ПИИИ; ее ограничение достигается установлением критерии безопасности в отношении отдельных факторов природного облучения [12].

Правовые основы обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации за счет ПИИИ в целях реализации конституционных прав граждан на охрану здоровья и благоприятную окружающую среду определены Федеральными законами № 3-ФЗ¹ и № 52-ФЗ².

Санитарные правила Российской Федерации – НРБ-99/2009³, ОСПОРБ 99/2010⁴ и СанПиН 2.6.4115-2025⁵ – устанавливают требования (гигиенические нормативы) или контрольные уровни (уровни вмешательства) к следующим показателям радиационной безопасности населения в части облучения ПИИИ:

- мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения на участках территорий, предназначенных под строительство, на территориях общего пользования и территориях, прилегающих к зданиям и сооружениям, в зданиях жилого, общественного и производственного назначения;
- уровню содержания радона (в единицах среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона и среднегодовой объемной активности (ОА) радона) в воздухе помещений зданий жилого, общественного и производственного назначения;
- плотности потока радона с поверхности грунта;
- уровню содержания ПРН (в единицах удельной активности ПРН) в питьевой воде;

¹ Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» (ред. от 31.07.2025). [Federal Law No. 3-FZ of 09.01.1996 “On Radiation Safety of the Population” (as amended on 31.07.2025). (In Russ.)]

² Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (ред. от 31.07.2025). [Federal Law No. 52-FZ of 30.03.1999 “On Sanitary and Epidemiological welfare of the population” (as amended on 31.07.2025). (In Russ.)]

³ 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.)]

⁴ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115), с изменениями, внесенными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 № 43 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 05.11.2013, регистрационный № 30309). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18115), as amended by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 16.09.2013 No. 43 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No. 30309). (In Russ.)]

⁵ 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.)]

- уровню содержания ПРН (в единицах удельной активности ПРН) в минеральных удобрениях и агрохимикатах;
- уровню содержания ПРН (в единицах эффективной удельной активности ПРН) в материалах и изделиях, используемых в быту, строительстве и производственной сфере, а также в производственных отходах.

До 01.09.2025 гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности населения при облучении ПИИИ содержались, кроме НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010, в СанПин 2.6.1.2800-10⁶ и СП 2.6.1.3247-15⁷. Положения этих документов в актуализированном виде, а также требования к природной минеральной воде, поступающей из источника или скважины, вошли в главы XIII и XIV СанПин 2.6.4115-2025. Транспортирование материалов, сырья и готовой продукции, содержащих только ПРН, должно осуществляться в соответствии с требованиями СанПин 2.6.1.1281-03⁸.

Действующая система нормативно-методических документов охватывает все регулируемые ПИИИ и определяет подходы к обеспечению радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ, тем самым обеспечивая выполнение Указа 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). Более того, требования к некоторым факторам, например, к показателю предварительной оценки качества питьевой воды по суммарной альфа-активности, к содержанию радона в воде подземных источников водоснабжения, в Российской Федерации даже более жесткие, чем в рекомендациях международных организаций [12].

Для обеспечения выполнения обязательных требований вышеуказанных санитарных правил разработаны, внедрены и широко используются во всех субъектах Российской Федерации методические документы (рекомендации, указания), регламентирующие алгоритмы радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки участков территории⁹ [13], зданий и сооружений¹⁰ [14, 15], радоновых лабораторий и отделений радонотерапии (радонолечебниц)¹¹, источников питьевого водоснабжения и питьевой воды^{12,13}, минеральных удобрений

⁶ Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 № 171 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 27.01.2011, регистрационный № 19587). [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 27.01.2011, registration No. 19587. Expired.). (In Russ.)]

⁷ Гигиенические требования к размещению, устройству, оборудованию и эксплуатации радоновых лабораторий, отделений радонотерапии: Санитарные правила СП 2.6.1.3247-15. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 12.01.2015 № 4 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 20.02.2015, регистрационный № 36171). [Hygienic requirements for the placement, arrangement, equipment and operation of radon laboratories, radon therapy departments. Sanitary rules SP 2.6.1.3247-15. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 12.01.2015 No. 4 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 20.02.2015, registration No. 36171. Expired.). (In Russ.)]

⁸ Санитарные правила по радиационной безопасности персонала и населения при транспортированииadioактивных материалов (веществ): Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.1281-03. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 17.03.2003 № 54 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 13.05.2003, регистрационный № 4529). [Sanitary rules on radiation safety of personnel and the public during transportation of radioactive materials (substances). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.1281-03. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 17.03.2003 No. 54 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 13.05.2003, registration No. 4529). (In Russ.)]

⁹ Радиационный контроль земельных участков, предназначенных под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения, а также прилегающей к зданиям и сооружениям территории и территории общего пользования: Методические рекомендации МР 2.6.1.0361-24. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 24.12.2024. [Radiation survey of land plots for construction of residential buildings, public and industrial buildings and facilities, territories adjacent to buildings and facilities, and public areas. Guidelines MR 2.6.1.0361-24. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 24.12.2024. (In Russ.)]

¹⁰ 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.)]

¹¹ Организация и проведение радиационного контроля в радоновых лабораториях и отделениях радонотерапии (радонолечебницах): Методические рекомендации МР 2.6.1.0280-22. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 31.03.2022. [Radiation survey of radon laboratories and radon therapy departments (radon spas). Guidelines MR 2.6.1.0280-22. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 31.03.2022. (In Russ.)]

¹² Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов: Методические указания МУ 2.6.1.1981-05. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 25.04.2005. [Radiation control and hygienic assessment of sources of drinking water supplies and drinking water in terms of radiation safety indicators. Optimization of protective measures for drinking water supplies with elevated radionuclide concentrations. Guidelines MU 2.6.1.1981-05. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 25.04.2005. (In Russ.)]

¹³ Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов. Изменение № 1 к МУ 2.6.1.1981-05: Методические указания МУ 2.6.1.2719-10. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 04.08.2010. [Radiation control and hygienic assessment of sources of drinking water supplies and drinking water in terms of radiation safety indicators. Optimization of protective measures for drinking water supplies with elevated radionuclide concentrations. Amendment No. 1 to MU 2.6.1.1981-05. Guidelines MU 2.6.1.2719-10. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 04.08.2010. (In Russ.)]

и агрохимикатов¹⁴, изделий на основе природных материалов¹⁵, а также методические документы по выборочному обследованию жилых зданий¹⁶, расчету эффективных доз облучения населения за счет ПИИИ¹⁷ и радиационного риска от радона^{18,19}, определению удельной активности ПРН в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах²⁰.

Учет и контроль данных об уровнях облучения населения Российской Федерации за счет ПИИИ

В рамках созданной Постановлением Правительства Российской Федерации от 16.06.1997 № 718²¹ Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД), в России с 2001 года по настоящее время функционирует Федеральный банк данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ), где аккумулируются и анализируются результаты всех проводимых на территории страны измерений параметров радиационной обстановки в части ПИИИ. Эти данные являются основой для оценки доз природного облучения населения отдельных субъектов Российской Федерации и страны в целом.

За 24 года функционирования ФБДОПИ, являющегося уникальным инструментом долговременного автоматизированного учета измерительных и адресных данных о параметрах радиационной обстановки в части облучения ПИИИ по всей территории страны, исходными данными для

оценки доз облучения населения Российской Федерации за счет ПИИИ стали результаты 2 549 785 измерений МАЭД гамма-излучения в жилых и общественных зданиях, 3 742 296 измерений МАЭД гамма-излучения на открытой местности, 854 525 измерений уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий и 270 026 измерений удельной активности ПРН в питьевой воде. Полученный по результатам многолетних исследований массив данных является основой для объективных оценок доз природного облучения населения как отдельных субъектов Российской Федерации, так и страны в целом.

По результатам всех измерений, накопленных в ФБДОПИ за период с 2001 по 2024 год, средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения Российской Федерации составила 3,33 мЗв, из которых 59,1 % (1,97 мЗв) – доза внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления изотопов радона и их ДПР; 20,4 % (0,68 мЗв) – доза внешнего терригенного облучения; 10,2 % (0,339 мЗв) – доза за счет космического излучения на поверхности Земли; 5,1 % (0,17 мЗв) – доза внутреннего облучения за счет ⁴⁰K. Доля дозы внутреннего облучения за счет содержания ПРН в продуктах питания составляет 3,9 % (0,131 мЗв), в питьевой воде – 1,1 % (0,038 мЗв). Наименьший вклад – 0,2 % (0,006 мЗв) – вносит доза внутреннего облучения за счет ингаляции долгоживущих ПРН с атмосферным воздухом.

Анализ данных ФБДОПИ позволил выявить на территории страны как отдельные группы населения, подвергающиеся высокому природному облучению, так и целые регионы

¹⁴ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка минеральных удобрений и агрохимикатов по показателям радиационной безопасности: Методические рекомендации МР 2.6.1.0091-14. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 02.07.2014. [Radiation control and sanitary assessment of mineral fertilizers and agrochemicals in terms of radiation safety indicators. Guidelines MR 2.6.1.0091-14. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 02.07.2014. (In Russ.)]

¹⁵ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка изделий на основе природных материалов (санитарно-технические изделия, посуда, декоративные и отделочные материалы, изделия художественных промыслов): Методические рекомендации МР 2.6.1.0092-14. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 02.07.2014. [Radiation control and sanitary assessment of consumer products made from natural materials (sanitary products, tableware, decorative and finishing materials, handicrafts). Guidelines MR 2.6.1.0092-14. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 02.07.2014. (In Russ.)]

¹⁶ Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения: Методические рекомендации МР № 11-2/206-09. Утверждены заместителем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 29.08.2000. [Sample survey of residential buildings to assess public radiation doses. Guidelines MR No. 11-2/206-09. Approved by the Deputy Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 29.08.2000. (In Russ.)]

¹⁷ Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Методические указания МУ 2.6.1.1088-02. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 04.01.2002. [Assessment of individual effective doses to the population due to natural sources of ionizing radiation. Guidelines MU 2.6.1.1088-02. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 04.01.2002. (In Russ.)]

¹⁸ 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.).]

¹⁹ Оценка радиационного риска для здоровья населения за счет внутреннего облучения радоном и его дочерними продуктами распада: Методические рекомендации МР 2.6.1.0172-20. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 10.04.2020. [Risk assessment for the population from internal exposure to radon and its progeny. Guidelines MR 2.6.1.0172-20. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 10.04.2020. (In Russ.)]

²⁰ Определение удельной активности природных радионуклидов в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах: Методические рекомендации МР 2.6.1/2.3.7.0216-20. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 22.09.2020. [Measurement of activity concentration of natural radionuclides in samples of food, soil, other environmental objects, and bioassays. Guidelines MR 2.6.1/2.3.7.0216-20. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 22.09.2020. (In Russ.)]

²¹ Постановление Правительства РФ от 16.06.1997 № 718 «О порядке создания Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан». [Decree of the Government of the Russian Federation of 16.06.1997 No. 718 "On the procedure for creating a Unified State System for Monitoring and Accounting for Individual Doses of Radiation to the Citizens". (In Russ.)]

с повышенными (более 5 мЗв/год) дозами облучения жителей за счет ПИИИ: Республика Алтай – 8,69 мЗв/год, Забайкальский край – 8,33 мЗв/год, Луганская Народная Республика – 6,10 мЗв/год, Еврейская АО – 6,02 мЗв/год, Республика Тыва – 5,65 мЗв/год, Ставропольский край – 5,35 мЗв/год, Иркутская область – 5,15 мЗв/год.

В течение четверти века оценка среднемировых доз природного облучения населения базировалась на данных, представленных Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) в отчете 2000 года [1, Table 31] и подтвержденных в отчете 2008 года [2, Table 12]. Согласно этим данным, среднемировая индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения составляет 2,4 мЗв: 0,39 мЗв – за счет космического излучения на поверхности Земли; 0,48 мЗв – за счет внешнего терригенного облучения; 1,25 мЗв – за счет внутреннего облучения изотопами радона и их ДПР; 0,006 мЗв – за счет внутреннего облучения при ингаляционном поступлении долгоживущих ПРН рядов урана и тория; 0,17 мЗв – за счет внутреннего облучения ^{40}K ; 0,12 мЗв – за счет внутреннего облучения при поступлении долгоживущих ПРН рядов урана и тория с пищей и водой.

Результаты анализа собираемой с 2001 года в рамках функционирования ФБДОПИ информации об уровнях и дозах природного облучения населения публикуются в виде ежегодного справочника «Радиационная обстановка на территории Российской Федерации» [3] (ранее «Дозы облучения населения Российской Федерации»). В течение всех этих лет считалось, что средняя доза природного облучения населения Российской Федерации примерно в полтора раза выше среднемировой: оцененная по всем результатам измерений за период 2001–2024 гг. средняя по стране годовая индивидуальная эффективная доза за счет всех ПИИИ составила 3,33 мЗв, доза за счет внутреннего облучения изотопами радона и их ДПР – 1,97 мЗв. Оценки средних по регионам годовых доз природного облучения населения за период 2001–2024 гг. лежат в диапазоне от 2,06 мЗв (Камчатский край) до 8,69 мЗв (Республика Алтай); дозы за счет радона – от 0,88 мЗв (Чукотский автономный округ) до 7,31 мЗв (Республика Алтай).

Однако на 71-й сессии НКДАР ООН (20-24 мая 2024 года, г. Вена, Австрия) Комитетом был одобрен новый отчет Генеральной ассамблее ООН «Оценка облучения населения источниками ионизирующего излучения» [16], который запланирован к публикации в конце 2025 – начале 2026 года. Согласно обновленным данным, среднемировая годовая эффективная индивидуальная доза облучения населения составляет почти 3,0 мЗв: 0,30 мЗв – за счет космического излучения; 0,40 мЗв – за счет внешнего терригенного облучения; 1,76 мЗв – за счет внутреннего облучения изотопами радона и их ДПР, 0,17 мЗв – за счет внутреннего облучения при поступлении ^{40}K с пищей и водой; 0,32 мЗв – за счет внутреннего облучения при поступлении долгоживущих ПРН рядов урана и тория с пищей и водой. Таким образом, средние дозы природного облучения населения Российской Федерации, как за счет всех ПИИИ (3,33 мЗв), так и отдельно за счет изотопов радона и их ДПР (1,97 мЗв), на самом деле всего на 11–12 % выше среднемировых, что вполне объяснимо преобладанием достаточно суровых климатических условий на территории страны (определяющих строительно-конструкционные особенности зданий) и чрезвычайным разнообразием геологических, геофизических и геодинамических

условий (определяющих интенсивность выделения радона из грунтов) [17]. Данный факт подтверждает правильность и адекватность организационных и методических подходов к получению, сбору, накоплению и анализу информации об уровнях и дозах облучения населения за счет всех основных ПИИИ, лежащих в основе действующей в Российской Федерации системы на базе ФБДОПИ.

Перспективы совершенствования отечественной нормативно-методической базы в части облучения ПИИИ

Несмотря на то, что действующие в Российской Федерации нормативные и методические документы в области обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ представляют собой достаточно целостную и стablyно функционирующую систему, на данный момент можно обозначить несколько направлений развития и модернизации отечественной нормативно-методической базы, что в полной мере соответствует одной из задач, поставленных Основами государственной политики: «совершенствование нормативно-правовой базы в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, в том числе критериев, принципов, системы нормирования и основных требований к обеспечению ядерной и радиационной безопасности с учетом стандартов и рекомендаций международных организаций в области использования атомной энергии».

Концептуально текущая нормативная база, касающаяся воздействия ПИИИ, основана на системе радиационной защиты, разработанной Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) еще в конце XX века [18–21]. Между тем, начиная с 2007 года МКРЗ продвигает новую систему, базирующуюся на концепциях ситуаций облучения (существующего, планируемого и аварийного) и референтных уровней [12], которая поддерживается и другими профильными международными организациями, такими как Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) [4–6] и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) [8].

В рамках выполнения плана мероприятий по реализации Основ государственной политики, утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 02.02.2019 № 139-р, поручения Правительства Российской Федерации от 01.03.2022 № АН-П7-2961 и подготовки к предстоящей в 2026 году миссии МАГАТЭ, коллективом ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева были разработаны и направлены в центральный аппарат Роспотребнадзора проекты санитарно-эпидемиологических правил и норм «Нормы радиационной безопасности (НРБ-2025)» и «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-2025)» для утверждения после прохождения всех предусмотренных для документов такого уровня процедур.

Разработка проектов НРБ-2025 и ОСПОРБ-2025 преследовала цель имплементировать в российскую систему государственного санитарно-эпидемиологического нормирования современные концепции радиационной защиты МКРЗ и МАГАТЭ, сохранив при этом лучшие отечественные практики, и, таким образом, не допустить снижения уже достигнутого уровня радиационной безопасности населения Российской Федерации.

Что касается непосредственно нормируемых величин и численных значений нормативов, то проект НРБ-2025 продолжает реализацию подхода по параллельному нормиро-

ванию отдельных факторов природного облучения как в величинах, традиционно в течение многих десятилетий используемых в отечественных санитарных правилах, так и в величинах, рекомендуемых международными организациями. Впервые этот подход был реализован во вступивших в силу с 01.09.2025 санитарных правилах СанПиН 2.6.4115-25, в которых норматив содержания радона в воздухе помещений установлен как в единицах среднегодовой ЭРОА изотопов радона, так и в единицах среднегодовой ОА радона, связанных стандартным значением коэффициента равновесия. Такой подход не только позволяет гармонизировать отечественные нормативы с международными рекомендациями, но и, сохранив привычные для российских пользователей величины, обеспечить плавный и постепенный переход к новой системе. Одновременно с этим открывается целое окно возможностей для производителей и импортеров оборудования по расширению номенклатуры средств измерений ОА радона, доступных российским пользователям, поскольку ранее этот процесс сдерживался малой востребованностью таких приборов из-за отсутствия нормативов содержания радона в воздухе, выраженных в виде ОА.

Описанные изменения в санитарных правилах несомненно повлекут за собой необходимость не только актуализировать целый ряд действующих методических документов, в том числе по радиационному контролю зданий, сооружений, участков территории, но и разработать недостающие. К ним относятся, например, методические рекомендации по радиационному контролю предприятий неядерных отраслей промышленности, добывающих и перерабатывающих минеральное и органическое сырье и подземные природные воды, использующих минеральное сырье и материалы с повышенным содержанием ПРН или продукцию на их основе, а также в результате деятельности которых образуются производственные отходы с повышенным содержанием ПРН. Данная сфера регулирования полностью соответствует одному из направлений, обозначенных в Основах государственной политики: «обеспечение защиты от радиационного воздействия работников (персонала)... организаций, использующих при осуществлении своей деятельности материалы с повышенным содержанием природных радионуклидов».

Заключение

В Российской Федерации более 20 лет эффективно действует уникальная система учета и контроля данных об уровнях всех основных параметров природного облучения населения; объем проводимых в Российской Федерации исследований факторов природного облучения является достаточным для получения объективных оценок доз облучения населения регионов за счет ПИИИ. Актуальность результатов работы ЕСКИД и ФБДОПИ подтверждена Основами государственной политики, в которых «совершенствование информационного обеспечения в области анализа и прогнозирования радиационной обстановки, в том числе развитие Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» обозначено как одно из основных направлений реализации государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности населения. Функционирование ФБДОПИ позволило систематизировать и проанализировать информацию о выявленных на территории России группах населения и отдельных регионах с высокими и повышенными дозами природного облучения.

Полученные с использованием данных ФБДОПИ средние оценки доз облучения населения Российской Федерации за счет ПИИИ хорошо согласуются с обновленными в 2024 году среднемировыми данными, представленными в отчете НКДАР ООН Генеральной ассамблее ООН, что также подтверждает, что подход к сбору и анализу информации об уровнях природного облучения, реализованный в Российской Федерации в рамках функционирования ЕСКИД и ФБДОПИ, дает объективную картину радиационной обстановки в стране в части облучения населения ПИИИ.

Действующая в Российской Федерации система нормативно-методических документов является надежным инструментом обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии всех регулируемых ПИИИ, определяющим законодательную основу для принятия управлений решений о проведении практических мероприятий по снижению высоких и повышенных уровней облучения населения за счет ПИИИ.

Развитие и модернизация нормативной базы с учетом стандартов и рекомендаций профильных международных организаций в соответствии с планом мероприятий по реализации Основ государственной политики позволит поднять отечественное санитарное законодательство на уровень современных мировых тенденций, сохранив при этом достигнутые высокие показатели обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кормановская Т.А. разработала общую концепцию и дизайн исследования, определила цель исследования и написала черновик рукописи.

Кононенко Д.В. проанализировал нормативно-методические документы, определил задачи исследования, подготовил английский перевод и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Васильев А.С. проанализировал данные ФБДОПИ и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. провел поиск и анализ литературных источников и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа не имела источников финансирования.

Литература

1. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations, 2000. 76 p.
2. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. New York: United Nations, 2010. 249 p.
3. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2023 году: справочник. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2024. 71 с. URL: http://niirg.ru/PDF/inf_sbor/2023.pdf (Дата обращения: 20.10.2025).
4. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы

- безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 477 с.
5. Protection of the Public Against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-32. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. 90 р.
 6. Protection of Workers Against Exposure Due to Radon. IAEA Safety Standards Series No. SSG-91. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2024. 46 р.
 7. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126 МКРЗ. Под ред. М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015. 92 с.
 8. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva: WHO Press, 2009. 110 р.
 9. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия. Под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. Спб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
 10. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон. От фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
 11. Маренний А.М. О возможности сокращения в России заболеваемости раком легкого, инициированного радоном. Размышления и предложения. М.: Директ-Медиа, 2025. 276 с.
 12. Кормановская Т.А. Сравнительный анализ российских и международных подходов к вопросам обеспечения радиационной безопасности при облучении природными источниками излучения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 40–49. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-40-49.
 13. 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.
 14. 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.
 15. 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.
 16. Аклеев А.В., Азизова Т.В., Иванов С.А. и др. Итоги 71-й Сессии научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН (Вена, 20–24 мая 2024 г.) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69, № 5. С. 5–14. DOI: 10.33266/1024-6177-2024-69-5-5-14.
 17. Маренний А.М., Кононенко Д.В., Труфанова А.Е. Радоновое обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариабельности объемной активности радона // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 51–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67.
 18. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ. Пер. с англ. М.В. Жуковского; под ред. А.В. Кружалова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 78 с.
 19. Principles for Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation. ICRP Publication 39 // Annals of the ICRP. 1984. Vol 1. P. 15.
 20. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Annals of the ICRP. 1991. Vol. 21, No 1-3. P. 202.
 21. Lung Cancer Risk from Exposures to Radon Daughters. ICRP Publication 50 // Annals of the ICRP. 1987. Vol. 17, No 1. P. 60.

Поступила: 22.10.2025

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

Васильев Алексей Серафимович – кандидат медицинских наук, исполняющий обязанности научного сотрудника лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-1277-3807

Сапрыкин Кирилл Александрович – старший научный сотрудник, заведующий лабораторией дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0003-2387-7051

Для цитирования: 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

Assessment of the system of ensurance of public radiation safety in the Russian Federation related to exposure to natural sources of ionizing radiation

Tatyana A. Kormanovskaya, Dmitry V. Kononenko, Alexey S. Vasilyev, Kirill A. Saprykin

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

The paper presents an assessment of the current state of the system of ensurance of public radiation safety in the Russian Federation related to exposure to natural sources of ionizing radiation. Summary: The regulatory and methodological documents regarding exposure to natural sources in force within the framework of the Russian sanitary legislation were analyzed. It is shown that for more than 20 years, the country has been operating a unique system for collecting, recording and analyzing data on the levels of all major natural sources of public exposure. The Federal databank of radiation doses to the public from exposure to natural and technologically enhanced radiation background contains the results of 2 549 785 ambient gamma dose rate measurements indoors in residential and public buildings and 3 742 296 measurements outdoors, 854 525 measurements of radon concentration indoors in residential and public buildings, and 270 026 measurements of activity concentration of natural radionuclides in drinking water, all taken in 2001–2024. It is shown that the average individual annual effective dose of public exposure to natural sources in the Russian Federation is 3.33 mSv, of which 1.97 mSv is the dose from inhalation of radon, thoron and their progeny. These results are consistent with the new global average data from the upcoming 2024/2025 UNSCEAR report. The paper also outlines the prospects for the development and modernization of the Russian regulatory and methodical documents related to public exposure to natural sources. Conclusion: The current regulatory system is a reliable tool for ensuring public radiation safety related to all regulated natural sources. The improvement of the regulatory framework, taking into account the standards and recommendations of international organizations, will make it possible to raise the Russian sanitary legislation to the level of modern global trends, while maintaining the achieved high levels of public radiation safety related to natural sources of radiation.

Key words: natural sources of ionizing radiation, regulatory and methodical documents, Unified System for Monitoring and Recording Individual Radiation Doses of Citizen, Federal databank.

Authors' personal contribution

Tatyana A. Kormanovskaya developed the general concept and design of the study, defined the goal and wrote a draft of the manuscript.

Dmitry V. Kononenko analyzed regulatory and methodical documents, defined the objectives of the study, made the translation, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Alexey S. Vasilyev analyzed the data from Federal data bank and edited the interim version of the manuscript.

Kirill A. Saprykin searched and analyzed literature data and edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work had no sources of funding.

References

1. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2000. 76 p.
2. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. New York: United Nations; 2010. 249 p.
3. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2023: reference book. St. Petersburg: RIRH after Prof. P.V. Ramzaev; 2024. 71 p. Available from: http://niirg.ru/PDF/inf_sbor/2023.pdf [Accessed 20 Oct 2025]. (In Russian).
4. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. IAEA safety standards series no. GSR Part 3. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. 436 p.
5. Protection of the Public Against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. IAEA Safety

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

- Standards Series No. SSG-32. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2015. 90 p.
6. Protection of Workers Against Exposure Due to Radon. IAEA Safety Standards Series No. SSG-91. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2024. 46 p.
 7. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Annals of the ICRP*. 2014;43(3): 73.
 8. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva: WHO Press; 2009. 110 p.
 9. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Saint Petersburg: RIRH after Prof. P.V. Ramzaev; 2018. 432 p. (In Russian).
 10. Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon. From fundamental research to regulatory practice. Moscow: Russian State Research Center – Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical-Biological Agency; 2016. 432 p. (In Russian).
 11. Marenny 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).
 12. Kormanovskaya TA. Comparative analysis of Russian and international approaches to radiation safety related to exposure to natural sources of radiation. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 40–49. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-40-49.
 13. 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 Gygiена = Radiation Hygiene*. 2025;18(1): 112–120. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-112-120.
 14. 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 Gygiена = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 138–147. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-138-147.
 15. 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 Gygiена = Radiation Hygiene*. 2024;17(4): 108–116. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-108-116.
 16. Akleyev AV, Azizova TV, Ivanov SA, Kiselev SM, Melikhova EM, Fesenko SV, et al. Results of the 71st Session of the United Nations Scientific Committee on the Effects of the Atomic Radiation (UNSCEAR) (Vienna, 20–24 May, 2024). *Meditinskaya radiobiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiobiology and Radiation Safety*. 2024;69(5): 5–14. (In Russian). DOI: 10.33266/1024-6177-2024-69-5-5-14.
 17. Marenny AM, Kononenko DV, Trufanova AE. Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor radon concentration. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 51–67. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67.
 18. Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. *Annals of the ICRP*. 1993;23(2): 45.
 19. Principles for Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation. ICRP Publication 39. *Annals of the ICRP*. 1984;14(1): 15.
 20. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 1991;21(1-3): 202.
 21. Lung Cancer Risk from Exposures to Radon Daughters. ICRP Publication 50. *Annals of the ICRP*. 1987;17(1): 60.

Received: October 22, 2025

For correspondence: **Tatyana A. Kormanovskaya** – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: f4dos@mail.ru)

ORCID: 0009-0005-7922-7367

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

Alexey S. Vasilyev – Candidate of Medical Sciences, Acting Researcher, Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-1277-3807

Kirill A. Saprykin – Senior Researcher, Head of the Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-2387-7051

For citation: Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V., Vasilyev A.S., Saprykin K.A. Assessment of the system of ensurance of public radiation safety in the Russian Federation related to exposure to natural sources of ionizing radiation. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 132–140. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-132-140

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-141-146

УДК: 621.039.9:614.876(470)

Анализ данных о мирных ядерных взрывах в радиационно-гигиенических паспортах субъектов Российской Федерации

Седнев К.А., Косарлукова Е.А., 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

В ходе реализации программы «Ядерные взрывы для народного хозяйства», в период с 1965 по 1985 год, на территории Российской Федерации было проведено 82 мирных ядерных взрыва. Важность мониторинга территории проведения взрывов обусловлена потенциальной возможностью распространения радиоактивного загрязнения из эпицентра взрыва в подземные и поверхностные воды, на поверхность земли, что может привести к загрязнению окружающей среды. В соответствии с СанПиН 2.6.1.2819-10 результаты радиационного контроля территории проведения мирных ядерных взрывов должны заноситься в радиационно-гигиенический паспорт территории. Целью работы является анализ полноты представления информации о радиационной обстановке в местах проведения мирных ядерных взрывов в радиационно-гигиенических паспортах территории субъектов Российской Федерации за период с 2010 по 2023 год. Материалы и методы: В работе использовались данные из радиационно-гигиенических паспортов территорий за 2010-2023 гг. тех субъектов Российской Федерации, в которых были проведены мирные ядерные взрывы. В качестве инструмента работы с паспортами территорий использовалась компьютерная программа ФБД-РГПт МР 2.6.1.0257-21. Результаты исследования и обсуждение: Анализ выявил существенные различия в качестве и полноте предоставляемых данных между регионами. При заполнении радиационно-гигиенических паспортов был отмечен формальный подход, дублирование данных. Были определены регионы, не учитывающие мирные ядерные взрывы при заполнении радиационно-гигиенических паспортов территорий за весь исследованный период. К числу таких субъектов относятся Ставропольский край, Ненецкий автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ, Республика Калмыкия и Республика Коми. Мурманская область включала информацию о мирных ядерных взрывах в радиационно-гигиенический паспорт территории один раз в 2019 году. Республика Саха-Якутия с 2017 года перестала представлять данные о мирных ядерных взрывах в радиационно-гигиенических паспортах. Заключение: Полученные результаты подчеркивают необходимость продолжения мониторинга территории проведения мирных ядерных взрывов, значимость межведомственного взаимодействия при подготовке радиационно-гигиенических паспортов территории.

Ключевые слова: радиационно-гигиенический паспорт территории, мирные ядерные взрывы, субъекты Российской Федерации, радиационная обстановка, радиационная безопасность.

Введение

Одним из источников потенциальной радиационной опасности для населения Российской Федерации (РФ) являются территории проведения мирных ядерных взрывов (МЯВ), выполнившихся в рамках программы «Ядерные взрывы для народного хозяйства» с 1965 по 1985 год. Всего на территории РФ было проведено 82 МЯВ [1–4]. Радиационный мониторинг территории проведения МЯВ не теряет и не будет терять своей актуальности на протяжении сотен лет. Это обусловлено потенциальной возможностью распространения радиоактивности из эпицентра взрыва в подземные и поверхностные воды, а также на поверхность земли, что может привести к загрязнению окружающей среды.

Контроль радиационной обстановки в охранной зоне и в населенных пунктах в радиусе до 30 километров от места проведения МЯВ осуществляется в соответствии с требованиями СанПиН 2.6.1.2819-10¹ «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» и включает измерение мощности дозы внешнего гамма-излучения и определение уровня поверхностного загрязнения почвы. Кроме того, требуется оценка удельной активности радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в природных пищевых продуктах и ³H, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr в воде открытых водоемов и в системе питьевого водоснабжения. Все полученные данные необходимо заносить в раздел IV радиационно-гигиенического паспорта территории (РГПт). При этом, если на территории субъекта

¹ СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2819-10 «Ensuring radiation safety of the population living in areas where nuclear explosions for peaceful purposes were carried out (1965 - 1988)» (In Russ.)].

Седнев Константин Андреевич

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: c.sednev@yandex.ru

РФ проводилось несколько взрывов, информация по каждому из них вносится отдельно. Результаты радиационного контроля вблизи мест проведения МЯВ и оценка доз облучения критических групп населения также подлежат внесению в РГПт.

В статье Тимофеевой и др. в 2010 году были предложены рекомендации по заполнению РГПт субъектов РФ в части внесения информации о МЯВ [5]. Было предложено приводить такие сведения, как: общая информация о МЯВ; близлежащие населенные пункты и расстояние до них в километрах; результаты радиационно-гигиенического мониторинга.

Цель исследования – анализ полноты предоставления информации в РГПт субъектов Российской Федерации о радиационной обстановке в местах проведения МЯВ за период с 2010 по 2023 год.

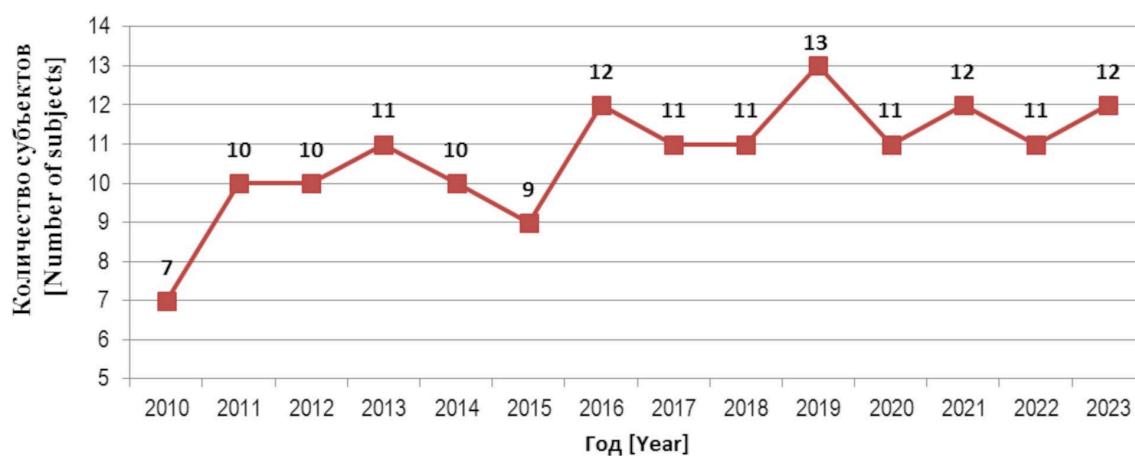
Материалы и методы

Для выполнения поставленной цели были проанали-

зированы РГПт за 2010-2023 гг. субъектов РФ, на территории которых были проведены МЯВ. Работа с РГПт велась с использованием компьютерной программы ФБД-РГПт MP 2.6.1.0257-21 (разработка ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) [6]. Всего было рассмотрено 266 РГПт 19 субъектов РФ: Республика Башкортостан, Республика Калмыкия, Республика Коми, Республика Саха (Якутия), Красноярский, Ставропольский, Пермский и Забайкальский края, Архангельская, Астраханская, Ивановская, Иркутская, Кемеровская, Мурманская, Оренбургская, Тюменская области, Ямalo-Ненецкий, Ханты-Мансийский и Ненецкий автономные округа. Донецкая Народная Республика была официально принята в состав РФ в 2022 году², по данному региону данные о МЯВ в РГПт за исследуемый период отсутствуют.

Результаты и обсуждение

Динамика количества субъектов РФ, предоставляющих данные о МЯВ в РГПт, отражена на рисунке.



■ Количество субъектов Российской Федерации, предоставляющих информацию о МЯВ в РГПт [The number of Russian subjects that submitted information on Peaceful Nuclear Explosions (PNEs) in their Radiation-Hygienic Passports of the territories (RHPts)]

Рис. Количество субъектов Российской Федерации, предоставляющих информацию о МЯВ в РГПт за период с 2010 по 2023 год

[**Fig.** Number of the Russian subjects that submitted information on Peaceful Nuclear Explosions (PNEs) to their Radiation-Hygienic Passports of the territories in 2010–2023]

В процессе анализа информации, представленной в РГПт, было выявлено, что значительная ее часть ежегодно дублируется или предоставляется не в полном объеме. Так, в отдельных субъектах РФ (Ханты-Мансийский АО, Республика Саха (Якутия)) информация предоставлялась не по всем МЯВ, произошедшим на их территориях. В РГПт часто применялись следующие формулировки: «в настоящее время обстановка является безопасной для проживания и оценивается как благополучная», «по результатам проведенных измерений радиационный фон не превышает природный», а также «загрязнения почвенно-

растительного покрова искусственными радионуклидами не обнаружено». Такие формулировки встречались в РГПт республики Башкортостан, Красноярского края, Мурманской, Кемеровской, Тюменской областей, Ямalo-Ненецкого АО. В них содержится информация о том, что МЯВ не оказывают негативного влияния на здоровье человека и состояние окружающей среды, однако конкретные результаты исследований не приводятся.

Результаты наличия сведений о МЯВ в РГПт субъектов РФ представлены в таблице 1.

²Федеральный конституционный закон от 04.10.2022 № 5-ФКЗ (ред. от 26.12.2024) «О принятии в Российскую Федерацию Донецкой Народной Республики и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта - Донецкой Народной Республики» [Federal Constitutional Law №. 5-FKZ of October 4, 2022 (as amended on December 26, 2024) «On the Admission of the Donetsk People's Republic into the Russian Federation and the Formation of a New Constituent Entity within the Russian Federation — the Donetsk People's Republic»] (In Russ.).

Таблица 1

Предоставление сведений о мирных ядерных взрывах в радиационно-гигиенические паспорта территорий субъектов РФ

Table 1

The submission of data on peaceful nuclear explosions to the radiation-hygienic passports of the territories of the Russian Federation's constituent entities]

Субъекты РФ [Subjects of the Russian Federation]	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Республика Башкортостан [Republic of Bashkortostan]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Республика Калмыкия [Republic of Kalmykia]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Республика Коми [Republic of Komi]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Республика Саха (Якутия) [Republic of Sakha (Yakutia)]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Красноярский край [Krasnoyarsk Krai]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ставропольский край [Stavropol Krai]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Архангельская область [Arkhangelsk Oblast]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Астраханская область [Astrakhan Oblast]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ивановская область [Ivanovo Oblast]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Иркутская область [Irkutsk Oblast]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Кемеровская область [Kemerovo Oblast]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Мурманская область [Murmansk Oblast]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Оренбургская область [Orenburg Oblast]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Пермский край [Perm Krai]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Тюменская область [Tumen Oblast]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ненецкий АО [Nenets Autonomous Okrug]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ханты-Мансийский АО [Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Yugra]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ямало-Ненецкий АО [Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ — представлена информация о МЯВ в РГПт [The information on PNEs in radiation-hygienic passports of territories is presented]

■ — информация о МЯВ в РГПт отсутствует [The information on PNEs in radiation-hygienic passports of territories is not present]

В ходе анализа были выявлены субъекты РФ, не предоставившие в исследуемый период информацию о МЯВ. К числу таких субъектов относятся Ставропольский край, Ненецкий автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ, Республика Калмыкия и Республика Коми. Мурманская область упоминала МЯВ в радиационно-гигиеническом паспорте территорий только в 2019 году. С 2017 года Республика Саха (Якутия) перестала включать данные о МЯВ в РГПт. При этом в период с 2010 по 2016 год она подробно

описывала результаты обследования территорий в разделе IX РГПт.

К числу положительных моментов следует отнести, что Тюменская область и Забайкальский край начали представлять информацию о МЯВ с 2016 и 2019 годов соответственно.

Распределение субъектов РФ по видам предоставляемой информации о МЯВ в РГПт представлены в таблице 2.

Таблица 2

Виды предоставляемой информации о мирных ядерных взрывах в радиационно-гигиенические паспорта территорий субъектов Российской Федерации	
<i>[Table 2 The types of information provided on peaceful nuclear explosions in the radiation-hygiene passports of the territories of the subjects of the Russian Federation]</i>	
Вид предоставления информации [Method of providing information]	Название субъекта РФ [Name of the federal subject of Russia]
Информация отсутствует [Information is missing]	Республика Калмыкия, Республика Коми, Ставропольский край, Ненецкий АО, Ямalo-Ненецкий АО
Данные представлены формально, без цифр [The data is presented formally, without numerical values]	Республика Башкортостан, Красноярский край, Архангельская область, Астраханская область, Кемеровская область, Мурманская область, Тюменская область, Ханты-Мансийский АО, Забайкальский край
Приведены фактические результаты измерений [The actual measurement results are provided]	Республика Саха (Якутия), Оренбургская область, Пермский край, Ивановская область, Иркутская область

В рамках отраслевой научно-исследовательской работы ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в 2023 году специалистами региональных ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» произведен отбор проб воды из источников питьевого водоснабжения (колодцы, скважины, центральное водоснабжение) и в водных объектах (реки, болота) населенных пунктов, расположенных в районах проведения МЯВ [7]. Отобранные пробы воды доставлены в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева для проведения измерений удельной активности трития в воде как показателя возможного выноса радионуклидов из зоны взрывов в водоносные горизонты. Результаты измерений удельной активности трития были внесены многими субъектами РФ в раздел IV РГПт.

Рекомендации по заполнению РГПт субъектов РФ в части внесения информации о МЯВ, предложенные в статье Тимофеевой, [5] практически не выполняются.

Заключение

Анализ РГПт субъектов РФ, на территории которых были проведены МЯВ, показал, что в разделе IV РГПт часто фиксируется неполная или дублирующая информация, не обновлявшаяся в течение длительного времени. В ряде субъектов информация о МЯВ не приводилась в течение всего анализируемого периода с 2010 по 2023 год. Это свидетельствует о системных проблемах в подготовке РГПт субъектов РФ, а также косвенно может свидетельствовать о недостаточном уровне радиационного контроля на местах проведения МЯВ или полном его отсутствии. Полученные результаты подчеркивают необходимость продолжения мониторинга территорий, на которых были проведены МЯВ, а также свидетельствуют о значимости межведомственного взаимодействия при подготовке радиационно-гигиенических

паспортов территорий. Можно констатировать, что рекомендации по заполнению РГПт, предложенные Тимофеевой с соавторами, остаются актуальными [5].

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Седнев К.А. разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, подготовил окончательный вариант рукописи.

Косарлукова Е.А. редактировала промежуточный вариант рукописи.

Библин А.М. редактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственному контракту № 81.011.20.2 от 20 мая 2020 года «Разработка и научное обоснование радиационно-гигиенических требований к охранным зонам мирных ядерных взрывов при переводе их в стадию консервации» (шифр: «Мирные РАО – 20») и отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно-гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».

Литература

- Современная радиоэкологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации / Кол. авторов под рук. проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2005. 256 с.
- Васильев А.П., Ильин В.А. Мирные ядерные взрывы // Траектория исследований – человек, природа, технологии. 2024. №4. С. 3–18.
- Храмцов Е.В., Репин В.С., Библин А.М. и др. Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 111–123.
- Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 27–33.
- Тимофеева М.А., Барковский А.Н., Медведев А.Ю. и др. О внесении данных о радиационно-гигиенической обстановке в местах проведения мирных ядерных взрывов в радиационно-гигиенический паспорт территории субъекта Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 51–54.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022685447 Российской Федерации. ФБД-РГПт МР 2.6.1.0257-21. № 2022684169. заявл. 08.12.2022; опубл. 23.12.2022.
- Репин В.С., Варфоломеева К.В., Библин А.М. и др. Содержание трития в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 67–78.

Поступила: 10.09.2025

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

ORCID: 0009-0006-7906-1106

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

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

Для цитирования: Седнев К.А., Косарлукова Е.А., Библин А.М. Анализ данных о мирных ядерных взрывах в радиационно-гигиенических паспортах субъектов Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 141–146. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-141-146

Analysis of the peaceful nuclear explosions data in radiation-hygienic passports of the subjects of the Russian Federation

Konstantin A. Sednev, Elena A. Kosarlukova, 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

During the implementation of the "Nuclear Explosions for the National Economy" program between 1965 and 1985, 82 peaceful nuclear explosions were conducted on the territory of the Russian Federation. Monitoring of the explosion sites is crucial due to the potential risk of radioactive contamination spreading from the epicenter into groundwater and surface waters, and onto the land surface, which could lead to environmental contamination. In accordance with SanPiN 2.6.1.2819-10, the results of radiation monitoring at peaceful nuclear explosion sites must be included into the Radiation-Hygienic Passports of the territories. The aim of this work is to analyze the completeness of information presentation regarding the radiation situation at peaceful nuclear explosion sites in the Radiation-Hygienic Passports of the constituent entities of the Russian Federation for the period from 2010 to 2023. Materials and Methods: The study used data from the Radiation-Hygienic Passports for 2010-2023 of those constituent entities of the Russian Federation where peaceful nuclear explosions were conducted. The computer program FBD-RGPt MR 2.6.1.0257-21 was used as the tool for working with the territorial passports. Results and Discussion: The analysis revealed significant differences between regions in the quality and completeness of the provided data. A formalistic approach and data duplication were noted in the completion of the Radiation-Hygienic Passports. Regions that did not account for peaceful nuclear explosions when filling out the Radiation-Hygienic Passports for the entire study period were identified. These subjects include Stavropol Krai, Nenets Autonomous Okrug, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, the Republic of Kalmykia, and the Republic of Komi. Murmansk Oblast included information on peaceful nuclear explosions in its territorial radiation-hygienic passport only once, in 2019. The Republic of Sakha (Yakutia) ceased providing data on peaceful nuclear explosions in the Radiation-Hygienic Passports from 2017 onwards. Conclusion: The obtained results highlight the necessity of continuing the monitoring of peaceful nuclear explosion sites and the importance of interagency cooperation in the preparation of Radiation-Hygienic Passports for the territories.

Key words: radiation-hygienic passport of the territory, peaceful nuclear explosions, Constituent entities of the Russian Federation, radiation conditions, radiation safety.

Konstantin A. Sednev

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

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

Authors' personal contribution

Konstantin A. Sednev developed design of the study, determined aims and objectives, prepared draft of the manuscript.

Elena A. Kosarlukova prepared draft of the manuscript.

Artem M. Biblin prepared draft of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the State Contract No. 81.001.20.2 with the Federal Medical and Biological Agency of Russia and the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025. «Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia» on the topic: «Improving and developing methods for monitoring environmental objects in areas where peaceful nuclear explosions are carried out. Radiation hygienic characteristics of sources of drinking water supply».

References

1. The modern radioecological situation in areas of peaceful nuclear explosions on the territory of the Russian Federation: collective authors under the editorship of Prof. VA Logachev. Moscow: IzdAT; 2005. 256 p. (In Russian).

2. Vasiliev AP, Ilyichev VA. Peaceful nuclear explosions. Traektoriya issledovaniy – chelovek, priroda, tekhnologii = Research trajectory – man, nature, technology. 2024; 4: 3–18. (In Russian).
3. Khramtsov EV, Repin VS, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Ivanov SA. Radiation-hygienic characteristic of the protected zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 111–123. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123.
4. Ramzaev VP, Repin VS, Khramtsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 27–33. (In Russian).
5. Timofeeva MA, Barkovsky AN, Medvedev AYu, Ramzaev VP, Repin VS. On including the data relevant to peaceful nuclear explosions in the radiation hygiene passport of a territorial subject of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2010;3(3): 51–54. (In Russian).
6. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2022685447 Russian Federation. FBD-RGPt MR 2.6.1.0257-21. №. 2022684169. appl.12/08/2022: publ. 12/23/2022.
7. Repin VS, Varfolomeeva KV, Biblin AM, Zelentsova SA, Sednev KA, Arkhangelskaya GV. Tritium content in water bodies in regions of peaceful nuclear explosions. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 67–78. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-67-78.

Received: September 10, 2025

For correspondence: Konstantin A. Sednev – Junior Researcher, 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. (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: c.sednev@yandex.ru)

ORCID: 0009-0006-7906-1106

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

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

For citation: Sednev K.A., Kosarlukova E.A., Biblin A.M. Analysis of data on peaceful nuclear explosions in radiation-hygienic passports of the subjects of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 141–146. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-141-146

Радиационный контроль при эксплуатации медицинских ускорителей электронов с использованием дозиметра ДКС-АТ1123

Барковский А.Н.¹, Буланова С.А.², Огородников С.А.²

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

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

Для проведения радиационного контроля медицинских ускорителей электронов широко используется дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123, предназначенный для дозиметрии импульсного фотонного излучения с энергией до 10 МэВ. Поскольку максимальная энергия тормозного излучения медицинских ускорителей электронов может значительно превышать эту величину, главной целью настоящей работы был расчет поправочных коэффициентов для компенсации энергетической зависимости чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123, позволяющих получать корректные результаты радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией электронов до 30 МэВ. Материалы и методы: Для этого авторами были проведены расчеты энергетических спектров тормозного излучения, генерируемого электронами с энергией 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 м. Расчеты проводились методом Монте-Карло. С использованием полученных данных были рассчитаны поправочные коэффициенты для компенсации энергетической зависимости дозиметра ДКС-АТ1123 для всех рассматриваемых энергий электронов и толщин бетонной защиты. Результаты исследования и обсуждение: Анализ полученных результатов показал, что поправочные коэффициенты слабо зависят от толщины бетонной защиты. Для толщин от 0,5 до 2,0 м различие полученных поправочных коэффициентов не превышает 8 %. Получены численные значения поправочных коэффициентов, равные 1,29; 1,44; 1,50; 1,56 и 1,60 для максимальной энергии тормозного излучения 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ соответственно. Заключение: Использование данных поправочных коэффициентов обеспечивает возможность проведения радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с использованием дозиметра ДКС-АТ1123.

Ключевые слова: медицинские ускорители электронов, импульсное тормозное излучение, радиационная защита из бетона, радиационный контроль медицинских ускорителей электронов.

Введение

Одним из важнейших аспектов обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения (ИИИ) является проведение радиационного контроля на рабочих местах персонала и в помещениях, смежных с помещением, в котором расположен техногенный ИИИ. Широкое использование в Российской Федерации медицинских ускорителей электронов (МУЭЛ) при лечении пациентов порождает необходимость регулярного проведения радиационного контроля при эксплуатации МУЭЛ. Но ситуация осложняется тем, что тормозное излучение МУЭЛ является импульсным и максимальная энергия тормозного излучения для значительной части используемых МУЭЛ превышает 10 МэВ. В Российской Федерации отсутствуют дозиметрические приборы, предназначенные для дозиметрии такого излучения [1]. В госреестре средств измерений имеется лишь один дозиметр, предназначенный для дозиметрии фотонного излучения с энергией до 20 МэВ – ДКГ-РМ1621 [2]. Но в качестве детектора в нем используется счетчик Гейгера-Мюллера, и

он не предназначен для дозиметрии импульсного фотонного излучения. В работе [2] обосновывается возможность его использования для этой цели, но для практической реализации этого необходимо проведение дополнительных исследований с учетом особенностей конструкции данного прибора. Кроме того, ряд современных МУЭЛ генерируют тормозное излучение с максимальной энергией более 20 МэВ [3]. На практике для этой цели используется дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 производства фирмы «АТОМТЕХ» (Республика Беларусь) [4]. Он предназначен для дозиметрии импульсного тормозного излучения с энергией до 10 МэВ. Данный прибор, по существу, является единственным доступным российским потребителям прибором для дозиметрии импульсного тормозного излучения. Но, формально, он не позволяет проводить радиационный контроль для тормозного излучения с максимальной энергией более 10 МэВ, что создает патовую ситуацию – контролировать необходимо, но нечем. Необходимость решения этой задачи отмечается и в работе [3].

В работе [5] была получена энергетическая зависимость чувствительности данного прибора к фотонному излучению

Барковский Анатолий Николаевич

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

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

с энергией до 50 МэВ и проведена оценка ожидаемой погрешности измерения им мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) тормозного излучения с максимальной энергией 20 МэВ за бетонной защитой различной толщины. Было показано, что прогнозируемое занижение результата измерения МАЭД данным прибором находится в пределах предусмотренной в технической документации энергетической зависимости показаний дозиметра для области энергий 3–10 МэВ, равной 50 %, и практически не изменяется для толщины бетонной защиты более 1 м. Это позволяет разработать методику проведения измерений прибором ДКС-АТ1123 МАЭД тормозного излучения с максимальной энергией, превышающей 10 МэВ, с использованием поправочных коэффициентов, зависящих от толщины бетонной защиты и максимальной энергии тормозного излучения. Такой подход рекомендован и в работе [6] для импульсных источников тормозного излучения высокой энергии. Для получения численных значений корректировочных коэффициентов к показаниям дозиметра ДКС-АТ1123 необходимо выполнить расчеты прогнозируемого занижения результатов измерения МАЭД тормозного излучения данным прибором для набора максимальных энергий тормозного излучения и толщин защиты, перекрывающего большинство встречающихся на практике случаев при использовании МУЭЛ. На основе анализа полученных результатов необходимо обосновать возможность использования ограниченного количества численных значений данных коэффициентов для реализации данного подхода. Решение данной задачи позволит получать корректные результаты радиационного контроля при эксплуатации МУЭЛ с помощью дозиметра ДКС-АТ1123 для максимальной энергии тормозного излучения, в 2–3 раза превышающей предельную энергию по паспорту данного прибора.

С учетом этого авторами были проведены расчеты спектров тормозного излучения, генерируемого вольфрамовой мишени пучком ускоренных электронов с энергией 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ, за бетонной защитой толщиной 0,5, 1, 1,5 и 2 м. Диапазон энергий выбран с учетом максимальной энергии ускоренных электронов в имеющихся и перспективных МУЭЛ, а бетон был выбран как основной материал, используемый в конструкциях радиационной защиты каньонов для размещения МУЭЛ.

Цель исследования – расчет поправочных коэффициентов для компенсации энергетической зависимости чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123, позволяющих получать корректные результаты радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с максимальной энергией тормозного излучения до 30 МэВ.

Материалы и методы

Расчеты энергетических спектров тормозного излучения, генерируемого вольфрамовой мишени пучком ускоренных электронов с энергией от 10 до 30 МэВ, за бетонной защитой проводились авторами с помощью компьютерной программы GEANT4 [7], использующей метод Монте-Карло. Программа GEANT4 позволяет моделировать прохождение фотонов различных энергий через конструкции радиационной защиты. При проведении расчетов рассматривалось прохождение квантов тормозного излучения, генерируемых при падении пучка ускоренных электронов с энергией 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ на вольфрамовую мишень полного поглощения, с последующим прохождением их через плоскую

бетонную защиту толщиной 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 м.

Расчеты проводились специалистами ООО «Сканtronик Системс» с использованием следующей геометрии расчета:

- точечный изотропный источник тормозного излучения, генерируемого при падении пучка моноэнергетических электронов с энергией 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ на вольфрамовую мишень толщиной 1,5 мм и диаметром 6 мм;

- на расстоянии 50 см за мишенью располагается плоский защитный барьер из бетона толщиной 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 м;

- на расстоянии 10 см за защитой в плоскости, параллельной поверхности защиты, симметрично относительно перпендикулярной к этой плоскости оси, проходящей через центр мишени, расположены два детектора:

- внутренний кольцевой детектор с внутренним диаметром 47 см и внешним диаметром 50 см;

- внешний кольцевой детектор с внутренним диаметром 93 см и внешним диаметром 100 см.

Использовался еще один детектор в виде сферы диаметром 3 см, центр которой расположен на расстоянии 10 см за защитой на оси, проходящей через центр мишени перпендикулярно плоскости защиты.

Результаты расчета были представлены в виде многогрупповых энергетических спектров и представляют собой количество квантов, прошедших через защиту и попавших в детектор, энергия которых попадает в энергетический диапазон, соответствующий данной энергетической группе.

С учетом того, что целью проведения измерений МАЭД является получение незаниженной оценки мощности эффективной дозы (МЭД). Ожидаемая погрешность измерений в данной работе определялась именно по отношению к МЭД.

Результаты и обсуждение

На основе полученных многогрупповых спектров рассчитывались многогрупповые значения МЭД, создаваемой тормозным излучением с данным энергетическим спектром. Полная мощность эффективной дозы, равная сумме полученных многогрупповых значений данной величины, нормировалась на 1. Расчеты многогрупповых значений мощности эффективной дозы (MED_i) проводились с использованием формулы:

$$MED_i = \frac{\Phi_i \cdot K_i^\delta}{\sum_{i=1}^{17} \Phi_i \cdot K_i^\delta}, \quad (1)$$

где MED_i – значение мощности эффективной дозы тормозного излучения фотонов i -й энергетической группы;

Φ_i – флюенс тормозного излучения фотонов i -й энергетической группы;

K_i^δ – среднее значение коэффициента перевода флюенса тормозного излучения в мощность эффективной дозы для i -й энергетической группы фотонов, Зв·см²;

N – используемое в расчете количество энергетических групп фотонов ($N = 17$);

E_i – границы используемых энергетических групп фотонов, МэВ;

i – энергетическая группа. Соответствует энергии фотонов от E_{i-1} до E_i .

Значения ожидаемого вклада фотонов различных энергетических групп в прогнозируемые показания дозиметра ДКС-АТ1123 определялись с использованием выражения:

$$ВПД_i = МЭД_i \cdot ЭД_i , \quad (2)$$

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

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

При этом сумма значений $ВПД_i$ для всех участвующих в расчете энергетических групп дает величину прогнозируемых показаний дозиметра ($ПД$) для единичного значения

мощности эффективной дозы при проведении радиационного контроля для данной максимальной энергии тормозного излучения и данной толщины бетонной защиты. Эта величина численно равна прогнозируемому занижению показаний дозиметра для указанных условий.

Многогрупповые значения коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы K_i^{∂} были рассчитаны с использованием данных работы [8]. При этом была выбрана геометрия передне-заднего облучения, для которого значения данного коэффициента наибольшие. Многогрупповые значения энергетической зависимости эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 $ЭД_i$ были рассчитаны с использованием данных работы [5].

Значения K_i^{∂} и $ЭД_i$ использованные в данной работе, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Использованные в данной работе 17-групповых значений эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 и коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы

[Table 1]

The 17-group values of the efficiency of recording the dose rate of photon radiation with the DKS-AT1123 dosimeter and the coefficients of photon fluence conversion into effective dose rate used in this work]

Номер [Number] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Дозовый коэффициент для передне-заднего облучения, $10^{-12} \text{ Зв}\cdot\text{см}^2$ [Dose coefficient for anterior-posterior irradiation, $10^{-12} \text{ Sv}\cdot\text{cm}^2$]	Энергетическая зависимость показаний дозиметра [Energy dependence of the dosimeter readings]
1	0 – 0,5	1,2	0,95
2	0,5 – 1,0	3,5	1,03
3	1,0 – 1,5	5,3	1,06
4	1,5 – 2,0	6,8	1,03
5	2,0 – 4,0	9,6	0,9
6	4,0 – 6,0	13,4	0,75
7	6,0 – 8,0	16,4	0,67
8	8,0 – 10	19,1	0,62
9	10 – 12	21,7	0,59
10	12 – 14	23,9	0,57
11	14 – 16	26,1	0,56
12	16 – 18	28,1	0,55
13	18 – 20	30,0	0,54
14	20 – 22	31,7	0,54
15	22 – 24	33,1	0,53
16	24 – 27	34,8	0,52
17	27 – 30	36,8	0,51

В таблице 2 приведены рассчитанные по формуле (1) многогрупповые значения МЭД фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 10 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м, зарегистрированные в сферическом детекторе, и соответствующие им многогрупповые значения ожидаемого вклада в показания дозиметра

ДКС-АТ1123, рассчитанные по формуле (2). Там же представлены ожидаемые показания дозиметра ДКС-АТ1123 ($ПД$) для различных толщин защиты при измерении единичного значения МЭД. В таблицах 3–5 приведены аналогичные результаты для максимальной энергии фотонов тормозного излучения 15, 20, 25 и 30 МэВ соответственно.

Таблица 2

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_i), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_i) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 10 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

Table 2

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_i), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_i) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 10 MeV behind the concrete shielding of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
		МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]
1	0 - 0,5	0,034	0,032	0,022	0,021	0,047	0,045	0,035	0,033
2	0,5 - 1,0	0,051	0,052	0,037	0,038	0,055	0,056	0,050	0,051
3	1,0 - 1,5	0,050	0,053	0,030	0,032	0,054	0,057	0,059	0,063
4	1,5 - 2,0	0,054	0,055	0,041	0,043	0,046	0,047	0,038	0,040
5	2,0 - 4,0	0,253	0,228	0,212	0,191	0,243	0,219	0,240	0,216
6	4,0 - 6,0	0,248	0,186	0,259	0,194	0,198	0,148	0,232	0,174
7	6,0 - 8,0	0,200	0,134	0,253	0,170	0,228	0,153	0,214	0,143
8	8,0 - 10	0,111	0,069	0,145	0,090	0,129	0,080	0,132	0,082
ПД [PD]	0 - 10	-	0,809	-	0,778	-	0,806	-	0,802

Таблица 3

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_i), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_i) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 15 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

Table 3

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_i), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_i) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 15 MeV behind concrete shield of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]					
		0,5		1,0		1,5	
		МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]
1	0 - 0,5	0,019	0,018	0,014	0,013	0,028	0,027
2	0,5 - 1,0	0,042	0,043	0,027	0,028	0,062	0,063
3	1,0 - 1,5	0,034	0,036	0,022	0,023	0,044	0,046
4	1,5 - 2,0	0,031	0,032	0,024	0,025	0,032	0,033
5	2,0 - 4,0	0,146	0,131	0,100	0,090	0,128	0,115
6	4,0 - 6,0	0,167	0,125	0,144	0,108	0,116	0,087
7	6,0 - 8,0	0,161	0,108	0,170	0,114	0,158	0,106
8	8,0 - 10	0,141	0,088	0,169	0,105	0,140	0,087
9	10 - 12	0,118	0,070	0,149	0,088	0,144	0,085
10	12 - 14	0,089	0,051	0,123	0,070	0,111	0,064
11	14 - 16	0,051	0,029	0,057	0,032	0,038	0,021
ПД [PD]	0 - 16	-	0,731	-	0,696	-	0,733

Радиационные измерения

Таблица 4

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_р), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_р) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 20 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

Table 4

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_r), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_r) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 20 MeV behind concrete shield of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shielding, m]					
		0,5		1,0		1,5	
		МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]	МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]	МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]
1	0 - 0,5	0,014	0,013	0,011	0,010	0,024	0,023
2	0,5 – 1,0	0,025	0,026	0,025	0,026	0,045	0,046
3	1,0 - 1,5	0,020	0,021	0,014	0,015	0,028	0,029
4	1,5 - 2,0	0,023	0,023	0,016	0,016	0,025	0,026
5	2,0 - 4,0	0,120	0,108	0,078	0,071	0,106	0,095
6	4,0 - 6,0	0,143	0,107	0,109	0,082	0,119	0,089
7	6,0 - 8,0	0,141	0,095	0,132	0,088	0,125	0,083
8	8,0 - 10	0,129	0,080	0,146	0,091	0,123	0,076
9	10 - 12	0,114	0,067	0,136	0,080	0,128	0,075
10	12 - 14	0,097	0,055	0,113	0,064	0,109	0,062
11	14 - 16	0,079	0,044	0,102	0,057	0,079	0,044
12	16 - 18	0,062	0,034	0,079	0,043	0,062	0,034
13	18 - 20	0,033	0,018	0,038	0,020	0,028	0,015
ПД [PD]	0 - 20	–	0,692	–	0,665	–	0,700
							0,705

Таблица 5

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_р), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_р) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 25 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

Table 5

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_r), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_r) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 25 MeV behind concrete shield of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]					
		0,5		1,0		1,5	
		МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]	МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]	МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]
1	0 - 0,5	0,010	0,009	0,007	0,007	0,023	0,022
2	0,5 – 1,0	0,023	0,024	0,018	0,018	0,051	0,053
3	1,0 - 1,5	0,016	0,017	0,012	0,013	0,040	0,042
4	1,5 - 2,0	0,018	0,019	0,012	0,012	0,027	0,028
5	2,0 - 4,0	0,095	0,086	0,066	0,059	0,099	0,089
6	4,0 - 6,0	0,119	0,089	0,093	0,070	0,089	0,067
7	6,0 - 8,0	0,121	0,081	0,107	0,072	0,110	0,074

Radiation measurements

Окончание таблицы 5

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
		МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]
8	8,0 - 10	0,113	0,070	0,120	0,074	0,107	0,066	0,085	0,053
9	10 - 12	0,103	0,061	0,114	0,067	0,100	0,059	0,077	0,045
10	12 - 14	0,091	0,052	0,111	0,063	0,096	0,054	0,088	0,050
11	14 - 16	0,079	0,044	0,094	0,053	0,072	0,041	0,076	0,043
12	16 - 18	0,069	0,038	0,085	0,047	0,067	0,037	0,091	0,050
13	18 - 20	0,057	0,031	0,063	0,034	0,051	0,027	0,046	0,025
14	20 - 22	0,046	0,025	0,055	0,030	0,032	0,017	0,054	0,029
15	22 - 24	0,032	0,017	0,034	0,018	0,029	0,015	0,041	0,022
16	24 - 27	0,008	0,004	0,010	0,005	0,006	0,003	0,011	0,006
ПД [PD]	0 - 27	-	0,666	-	0,641	-	0,695	-	0,694

Таблица 6

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_i), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_i) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 30 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

[Table 6

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_i), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_i) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 30 MeV behind concrete shield of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
		МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]
1	0 - 0,5	0,008	0,008	0,006	0,006	0,018	0,017	0,021	0,020
2	0,5 - 1,0	0,020	0,021	0,015	0,015	0,044	0,045	0,046	0,048
3	1,0 - 1,5	0,013	0,014	0,011	0,011	0,025	0,027	0,023	0,024
4	1,5 - 2,0	0,015	0,016	0,011	0,012	0,025	0,026	0,020	0,021
5	2,0 - 4,0	0,080	0,072	0,056	0,050	0,084	0,076	0,078	0,070
6	4,0 - 6,0	0,103	0,078	0,076	0,058	0,088	0,066	0,079	0,059
7	6,0 - 8,0	0,106	0,071	0,095	0,064	0,091	0,061	0,088	0,059
8	8,0 - 10	0,102	0,063	0,102	0,064	0,098	0,061	0,080	0,050
9	10 - 12	0,094	0,056	0,105	0,062	0,090	0,053	0,093	0,055
10	12 - 14	0,084	0,048	0,095	0,054	0,085	0,049	0,085	0,049
11	14 - 16	0,075	0,042	0,085	0,048	0,073	0,041	0,079	0,044
12	16 - 18	0,066	0,037	0,078	0,043	0,070	0,038	0,099	0,054
13	18 - 20	0,057	0,031	0,066	0,036	0,053	0,029	0,055	0,030
14	20 - 22	0,050	0,026	0,057	0,030	0,047	0,025	0,048	0,025
15	22 - 24	0,043	0,022	0,048	0,025	0,032	0,017	0,036	0,018
16	24 - 27	0,053	0,027	0,058	0,029	0,052	0,027	0,042	0,022
17	27 - 30	0,030	0,016	0,037	0,019	0,025	0,013	0,029	0,015
ПД [PD]	0 - 30	-	0,647	-	0,625	-	0,669	-	0,663

Анализ представленных результатов показывает, что равновесный энергетический спектр тормозного излучения, сформированный слоем бетона толщиной 0,5 м, мало изменяется при больших толщинах защиты, и коэффициент ожидаемого занижения показаний дозиметра слабо зависит от толщины защиты. Так, для максимальной энергии 10 МэВ разброс значений составляет от 0,778 до 0,809 (4 %), для 15 МэВ – от 0,696 до 0,752 (8 %), для 20 МэВ – от 0,665 до 0,705 (6 %), для 25 МэВ – от 0,641 до 0,695 (8 %), для 30 МэВ от 0,625 до 0,669 (7 %). По-видимому, это связано с тем, что поглощение фотонов низкоэнергетической части спектра

в защите компенсируется рассеянным излучением фотонов большей энергии.

Аналогичные расчеты были проведены и для энергетических спектров фотонов, зарегистрированных во внутреннем и во внешнем кольцевых детекторах.

В таблице 7 представлены полученные значения прогнозируемых показаний дозиметра ДКС-АТ1123 для единичного значения МЭД для перпендикулярного защите направления излучения (сферический детектор) и двух наклонных направлений излучения (внешний и внутренний кольцевые детекторы).

Таблица 7

Прогнозируемые показания дозиметра ДКС-АТ1123 для единичного значения мощности эффективной дозы в позиции сферического, внутреннего кольцевого и внешнего кольцевого детекторов и значения поправочного коэффициента ПК

[Table 7]

Predicted readings of the DKS-AT1123 dosimeter for a single value of the effective dose rate at the position of the spherical, inner ring and outer ring detectors and values of correction factor CF]

Позиция детектора [Detector position]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shielding, m]				ПК _{мин} [CF _{min}]	ПК _{макс} [CF _{max}]
	0,5	1,0	1,5	2,0		
Максимальная энергия спектра 10 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 10 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,809	0,778	0,806	0,802	1,24	1,29
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,876	0,825	0,819	0,800	1,14	1,25
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,888	0,851	0,828	0,815	1,13	1,23
Максимальная энергия спектра 15 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 15 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,731	0,696	0,733	0,752	1,33	1,44
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,828	0,766	0,764	0,758	1,21	1,32
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,842	0,800	0,773	0,782	1,19	1,29
Максимальная энергия спектра 20 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 20 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,692	0,665	0,700	0,705	1,42	1,50
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,798	0,751	0,740	0,731	1,25	1,37
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,817	0,791	0,747	0,739	1,22	1,35
Максимальная энергия спектра 25 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 25 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,666	0,641	0,695	0,694	1,44	1,56
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,788	0,727	0,741	0,734	1,27	1,38
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,817	0,770	0,751	0,749	1,22	1,34

Окончание таблицы 7

Позиция детектора [Detector position]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shielding, m]				ΠK_{\min} [CF _{min}]	ΠK_{\max_c} [CF _{max}]
	0,5	1,0	1,5	2,0		
Максимальная энергия спектра 30 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 30 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,647	0,625	0,669	0,663	1,49	1,60
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,785	0,717	0,720	0,717	1,27	1,39
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,821	0,769	0,730	0,727	1,22	1,38

Как видно из представленных результатов, наибольшее занижение результатов измерения имеет место для позиции сферического детектора, т.е. для зоны наибольшей мощности дозы за защитой, в которой чаще всего и производят радиационный контроль. При наклонных падениях увеличивается вклад низкоэнергетического излучения и значения ПД возрастают. Поэтому целесообразно использовать ПД для сферического детектора, как позиции, наиболее часто используемой для проведения радиационного контроля и обеспечивающей умеренно консервативную оценку. С увеличением максимальной энергии тормозного излучения от 10 МэВ до 30 МэВ величина ПД монотонно уменьшается на 24 %. Зависимость от толщины бетонной защиты менее выражена (не превышает 8 %) и без явной тенденции с минимальным значением для толщины защиты 1 м. Поправочный коэффициент (ΠK), на который необходимо умножить прогнозируемый результат измерения, для получения точного значения мощности эффективной дозы, равен:

$$\Pi K = 1/\Pi D .$$

В таблице 7 представлены полученные значения минимальных (ΠK_{\min}) и максимальных значений (ΠK_{\max_c}) поправочных коэффициентов для различных максимальных энергий тормозного излучения и различных детекторов.

Поскольку целью радиационного контроля является получение незаниженного значения МЭД, выбираем для каждой максимальной энергии тормозного излучения максимальное значение ΠK_{\max_c} для сферического детектора. При этом консерватизм оценки при измерениях в позиции сферического детектора не превысит 8 %, т.е. является вполне приемлемым.

На рисунке более наглядно представлена энергетическая зависимость поправочного коэффициента и показана аппроксимация ее следующим полиномом:

$$\Pi K = -0,0006 \cdot E^2 + 0,0399 \cdot E + 0,962 .$$

Данная аппроксимация может использоваться для максимальных энергий тормозного излучения, отличных от рассмотренных в данной работе.

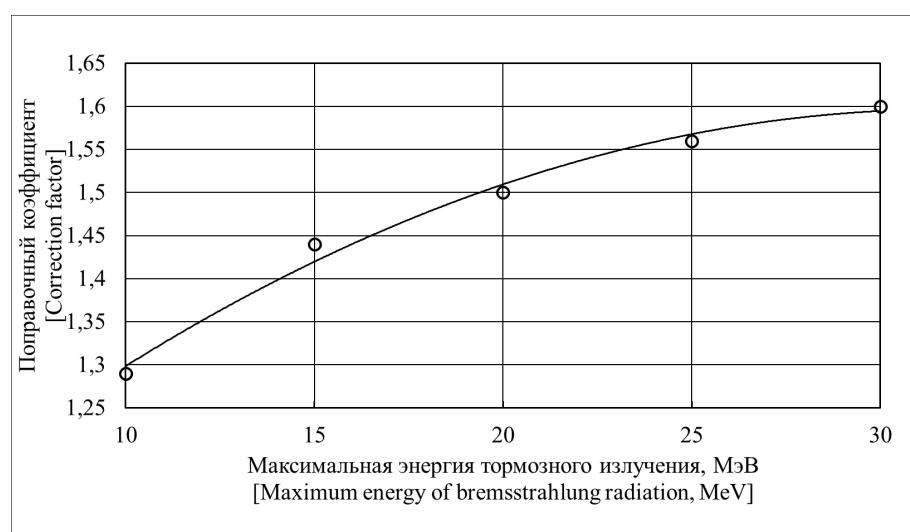


Рис. Энергетическая зависимость максимального значения поправочного коэффициента
[Fig. Energy dependence of the maximum value of the correction factor]

Заключение

В результате проведенного исследования получены правоученные коэффициенты для результатов измерения МАЭД тормозного излучения с максимальной энергией от 10 до 30 МэВ за бетонной защитой толщиной от 0,5 до 2,0 м с использованием дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123. Численные значения данных коэффициентов составляют 1,29, 1,44, 1,50, 1,56 и 1,60 для максимальных энергий тормозного излучения 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ соответственно. Использование данных коэффициентов позволяет скомпенсировать энергетическую зависимость чувствительности данного дозиметра и получить по результатам измерений умеренно консервативную оценку МЭД для максимальных энергий тормозного излучения до 30 МэВ, т.е. для всего диапазона существующих и перспективных МУЭЛ.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Барковский А.Н. – концепция, написание рукописи.
Буланова С.А. – проведение расчетов спектров тормозного излучения за защитой.

Огородников С.А. – участие в анализе полученных результатов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

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

Буланова Софья Андреевна – инженер-физик, Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория Скантроник», Санкт-Петербург, Россия

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

Для цитирования: Барковский А.Н., Буланова С.А., Огородников С.А. Радиационный контроль при эксплуатации медицинских ускорителей электронов с использованием дозиметра ДКС-АТ1123 // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 3. С. 147–156. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-147-156

Литература

- Мартынюк Ю.Н. Государственный реестр средств измерений. Часть 2. Дозиметры общего назначения, импульсные и специальные // АНРИ. 2020. № 4 (103). С. 3-13.
- Титов Н.В. Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения // Радиационная гигиена. 2019;12(2): 76-80.
- Нурлыбаев К., Мартынюк Ю.Н., Каракаш А.И. и др. Радиационная безопасность в лучевой терапии с использованием ускорителей электронов // АНРИ. 2014. № 1. С. 15-21.
- Описание типа средства измерений. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123. Приложение к свидетельству № 75466 об утверждении типа средств измерений.
- Барковский А.Н., Огородников С.А. Возможность использования дозиметра ДКС-АТ1123 для радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией более 10 МэВ // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 38-45.
- Мартынюк Ю.Н., Нурлыбаев К., Ревков А.А. Дозиметры импульсного излучения // АНРИ. 2018. № 1 (92). С. 2-11.
- Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce Dubois P., Asai M. et al. Geant4 developments and applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. 53 No. 1. P. 270-278.
- ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures.

Поступила: 15.07.2025

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

Anatoly N. Barkovsky¹, Sofia A. Bulanova², Sergey A. Ogorodnikov²

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

² Limited liability company «Laboratory Scantronic», Saint Petersburg, Russia

The X-ray and gamma radiation dosimeter DKS-AT1123, designed for dosimetry of pulsed photon

Anatoly N. Barkovsky

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

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

radiation with an energy of up to 10 MeV, is widely used for radiation monitoring of medical electron accelerators. Since the maximum energy of the bremsstrahlung radiation of medical electron accelerators can significantly exceed this value, the main purpose of this work was to calculate correction factors to compensate for the energy dependence of the sensitivity of the DKS-AT1123 dosimeter. It makes possible to obtain correct results of radiation monitoring of medical electron accelerators with an electron energy of up to 30 MeV. Materials and Methods: For this purpose, the authors calculated the energy spectra of bremsstrahlung radiation generated by electrons with energies of 10, 15, 20, 25 and 30 MeV behind concrete shield with a thickness of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 m. Calculations were performed using the Monte Carlo method. Using the data obtained, correction coefficients to compensate for the energy dependence of the DKS-AT1123 dosimeter for all considered electron energies and concrete shield thicknesses were calculated. Results and Discussion: An analysis of the results showed that the correction factors are weakly dependent on the thickness of the concrete shield. For thicknesses from 0.5 to 2.0 m, the differences in the correction coefficients do not exceed 8 %. Numerical values of correction coefficients equal to 1.29; 1.44; 1.50; 1.56 and 1.60 were obtained for the maximum bremsstrahlung radiation energy of 10, 15, 20, 25 and 30 MeV, respectively. Conclusion: The use of these correction factors makes it possible to conduct radiation monitoring of medical electron accelerators using the DKS-AT1123 dosimeter.

Key words: medical electron accelerators, pulsed bremsstrahlung radiation, radiation shield made of concrete, radiation control of medical electron accelerators.

Authors' personal contribution

Barkovsky A.N. – concept, manuscript writing.

Bulanova S.A. – carrying out calculations of the bremsstrahlung spectra behind the shielding.

Ogorodnikov S.A. – participation in the analysis of the obtained results.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. Martynyuk YuN. The State Register of Measuring Instruments. Part 2. General-purpose, pulse and special dosimeters. *ANRI = ANRI*. 2020;4(103): 3-13. (In Russian).
2. Titov NV. The possibility of using dosimeters with a Geiger-Muller counter for dosimetry of pulsed radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 76-80. (In Russian).
3. Nurlybaev K, Martynyuk YuN, Karakash AI, Sinnikov LL, Lykova EN, Galyautdinova ZZ, et al. Radiation safety in radiation therapy using electron accelerators. *ANRI = ANRI*. 2014;1: 15-21. (In Russian).
4. Description of the type of measuring instrument. X-ray and gamma radiation dosimeters DKS-AT1121, DKS-AT1123. Appendix to Certificate No. 75466 on type approval of measuring instruments. (In Russian).
5. Barkovsky AN, Ogorodnikov SA. The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with the energy of more than 10 MeV. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 38-45. (In Russian).
6. Martynyuk UN, Nurlybaev K, Revkov AA. Pulse radiation dosimeters. s. *ANRI = ANRI*. 2018;1(92): 2-11. (In Russian).
7. Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce Dubois P, Asai M. Geant4 developments and applications *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2006;53(1): 270-278.
8. ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures.

Received: July 15, 2025

For correspondence: Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Center, Chief Researcher, 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: ANBarkovski@yandex.ru)

Sofia A. Bulanova – Physics Engineer of Scantronic Laboratory LLC, Saint Petersburg, Russia

Sergey A. Ogorodnikov – General Director of Scantronic Laboratory LLC, Saint Petersburg, Russia

For citation: Barkovsky A.N., Bulanova S.A., Ogorodnikov S.A. The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with an energy of more than 10 MeV. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 3. P. 147–156. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-147-156

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-157-161

УДК: 614.876:004

О переработке программного обеспечения Единой системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан и радиационно-гигиенической паспортизации

Ахматдинов Руслан Р.¹, Библин А.М.¹, Ахматдинов Рустам Р.¹, Вишнякова Н.М.^{1,2}

¹Санкт-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

²Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

Контроль и учет доз облучения является эффективным инструментом обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации. Информационной основой такого контроля и учета являются Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан и система радиационно-гигиенической паспортизации организаций и территорий. Программное обеспечение названных систем было разработано в начале 2000-х годов и к настоящему моменту технологически устарело. Целью работы является определение наиболее перспективных подходов к совершенствованию данного программного обеспечения. Материалы и методы. Проведен анализ недостатков существующего программного обеспечения, определены наиболее эффективные с учетом экономических, материально-технических и временных затрат направления переработки программного обеспечения. Результаты и обсуждение: Разработан прототип программного обеспечения с использованием языка программирования Python и системы управления базами данных SQLite. Заключение. Разработанный прототип обеспечивает кроссплатформенность, портативность, возможность интеграции с региональными и федеральными банками данных и высокий уровень информационной безопасности.

Ключевые слова: радиационно-гигиеническая паспортизация, ЕСКИД, программное обеспечение, радиационная безопасность, Python, SQLite.

Введение

Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД) и система радиационно-гигиенической паспортизации организаций и территорий (РГП) являются основными источниками информации о радиационной обстановке и дозах облучения населения. Они представляют собой комплекс организационных мероприятий, методических и программных средств, обеспечивающих сбор, хранение и анализ данных о состоянии радиационной безопасности населения в Российской Федерации [1-3]. Наличие достоверных сведений об уровнях облучения населения обеспечивает информационную поддержку для принятия управлеченческих решений в области санитарно-эпидемиологического надзора и обеспечения радиационной безопасности. ЕСКИД и РГП также являются информационной основой при подготовке ежегодного Государственного доклада о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в части радиационной гигиены [4].

Согласно действующим нормативно-правовым актам, юридические лица, эксплуатирующие источники ионизирующего излучения, обязаны ежегодно представлять статистические формы отчетности № 1-ДОЗ «Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующих излучений», № 2-ДОЗ «Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях радиационной аварии или планируемого повышения облучения, а также лиц из населения, подвергшегося аварийному облучению», а также радиационно-гигиенический паспорт организации. Медицинские организации дополнительно сдают форму № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований». 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»^{1,2}.

¹Постановление Правительства РФ от 16.06.1997 № 718 (ред. от 05.06.2013) «О порядке создания Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 718 of June 16, 1997 (as amended on June 5, 2013) "On the Procedure for Establishing the Unified System of Individual Dose Control of the citizens"(In Russ.)]

²Постановление Правительства РФ от 28.01.1997 № 93 (в ред. от 10.07.2014) «О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 93 of January 28, 1997 (as amended on July 10, 2014) "On the Procedure for Developing Radiation-Hygiene Passports for Organizations and Territories"(In Russ.)]

Ахматдинов Руслан Расимович

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: rusl.akh@niirg.ru

В настоящее время заполнение отчетных форм осуществляется с применением специализированного некоммерческого программного обеспечения (ПО), разработанного ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и размещенного на его официальном сайте (<http://niirg.ru/SoftWare.htm>). Каждая форма реализована в виде отдельного программного пакета, созданного в среде разработки Microsoft Visual FoxPro более 20 лет назад.

Цель исследования – определить перспективные подходы к переработке ПО ЕСКИД и РГП.

Материалы и методы

Для выполнения цели исследования был проведен анализ недостатков существующего ПО, определены наиболее эффективные с учетом экономических, материально-технических и временных затрат направления переработки ПО.

Результаты и обсуждение

Специализированное ПО ЕСКИД и РГП выполняет базовые функции по формированию отчетности, однако обладают рядом ограничений, которые существенно осложняют работу на современном этапе развития информационных технологий.

Опыт обеспечения функционирования и разработки ПО ЕСКИД и РГП позволил выявить ряд системных недостатков, которые необходимо учитывать при планировании модернизации ПО. Приложения построены на основе Visual FoxPro 6.0, поддержка которого компанией Microsoft прекращена в 2008 году, что делает их уязвимыми с точки зрения информационной безопасности. Современные, в том числе отечественные, операционные системы обеспечивают лишь ограниченную совместимость с данными приложениями, что приводит к сбоям в работе и дополнительно нагружает техническую поддержку. Модульная разрозненность системы, где каждая форма представляет собой отдельное приложение без единой базы данных, вынуждает пользователя работать одновременно с несколькими программами и вручную переносить данные между ними.

Функциональные возможности существующего ПО серьезно ограничены. Используемая система управления базами данных (СУБД) работают с DBF-файлами, не поддерживая современного SQL-синтаксиса, что сужает возможности обработки информации. В системе отсутствуют инструменты для визуализации данных: построения графиков, дашбордов, диаграмм. Подготовленные отчеты часто требуют ручной доработки в сторонних текстовых редакторах. Пользовательский интерфейс не соответствует современным стандартам и характеризуется архаичным дизайном, фиксированными окнами, отсутствием адаптации под различные разрешения экранов, проблемами кодировки шрифтов и т.п. Поддержка и развитие системы затруднены в связи с дефицитом специалистов по устаревшему языку программирования. Любые доработки требуют применения неофициальных инструментов разработки.

Сложившаяся ситуация требует перехода к созданию единого современного программного комплекса, объединяющего возможности по заполнению обязательных отчетных форм. Разработка такого ПО нацелена на сокращение трудозатрат и ошибок, повышение качества данных и обеспечение их согласованности между различными уровнями учета и анализа при минимальных материальных вложениях.

Основным вопросом, стоящим при выборе направления переработки ПО, является выбор между реализацией его в виде веб-сервиса или оффлайн-программ традиционных для ЕСКИД и РГП.

Подход с использованием веб-сервисов создает для разработчика следующие риски: расходы на создание и поддержание работоспособности инфраструктуры, необходимость обеспечения кибербезопасности и отказоустойчивости сервиса, зависимость от качества интернет-соединения у конечных пользователей.

Разработка оффлайн-программ обладает следующими преимуществами:

- экономическая эффективность: после разовой разработки система не требует эксплуатационных расходов;
- устойчивость: функционирование не зависит от интернет-соединения и сторонней инфраструктуры;
- безопасность: данные физически остаются у пользователя, минимизируя риски несанкционированного доступа;
- относительная простота технической поддержки: отсутствие необходимости в серверном администрировании.

В качестве основы для разработки нового ПО выбраны современные кроссплатформенные инструменты: язык программирования Python и СУБД SQLite. Такой подход позволяет создать приложение, не требующее установки на компьютер пользователя, и может использоваться как в среде Windows, так и в отечественных операционных системах на базе ядра Linux. Портативность и автономность работы обеспечивают широкую применимость, в том числе в организациях с ограниченными техническими ресурсами.

Для обеспечения удобства работы заполняющих организаций принято решение о разработке единой программы ФФ-ЕСКИД-РГП, позволяющей заполнять формы ЕСКИД и РГП на уровне организации. В программе ФФ-ЕСКИД-РГП формируется база данных организации, которая содержит все необходимые сведения о юридическом лице, эксплуатирующем источники ионизирующего излучения. На основании этой базы автоматически формируются формы отчетности и радиационно-гигиенический паспорт организации.

Разработанный прототип предусматривает следующие ключевые возможности, учитывающие результаты анализа недостатков существующего ПО:

- ведение единого массива данных для организации;
- автоматическую генерацию отчетных форм на основании введенных сведений;
- проверку данных на логическую согласованность и корректность;
- экспорт отчетов в электронном виде и вывод на печать для предоставления в надзорные органы.

В отличие от существующих разрозненных приложений, новое решение исключает дублирование ввода, минимизирует риск несоответствий и позволяет в любой момент времени сформировать как отдельные формы, так и полный комплект документов.

Ожидаемые эффекты от внедрения нового ПО включают значительное сокращение временных затрат на подготовку отчетности, повышение качества и достоверности данных, снижение нагрузки на специалистов, ответственных за радиационную безопасность в организации, а также повышение уровня радиационной безопасности за счет более оперативного и точного анализа информации.

Краткие сообщения

Перспективным направлением развития является создание многопользовательской версии с возможностью распределения ролей и разграничением доступа, внедрение веб-интерфейса для удаленной работы. Дополнительно может быть реализован модуль визуализации данных, позволяющий строить графики, тренды, географические карты.

Все это позволит использовать систему не только как инструмент отчетности, но и как платформу анализа данных и управления радиационными рисками. Интерфейс прототипа ПО ФФ-ЕСКИД-РГП объектового уровня представлен на рисунке.

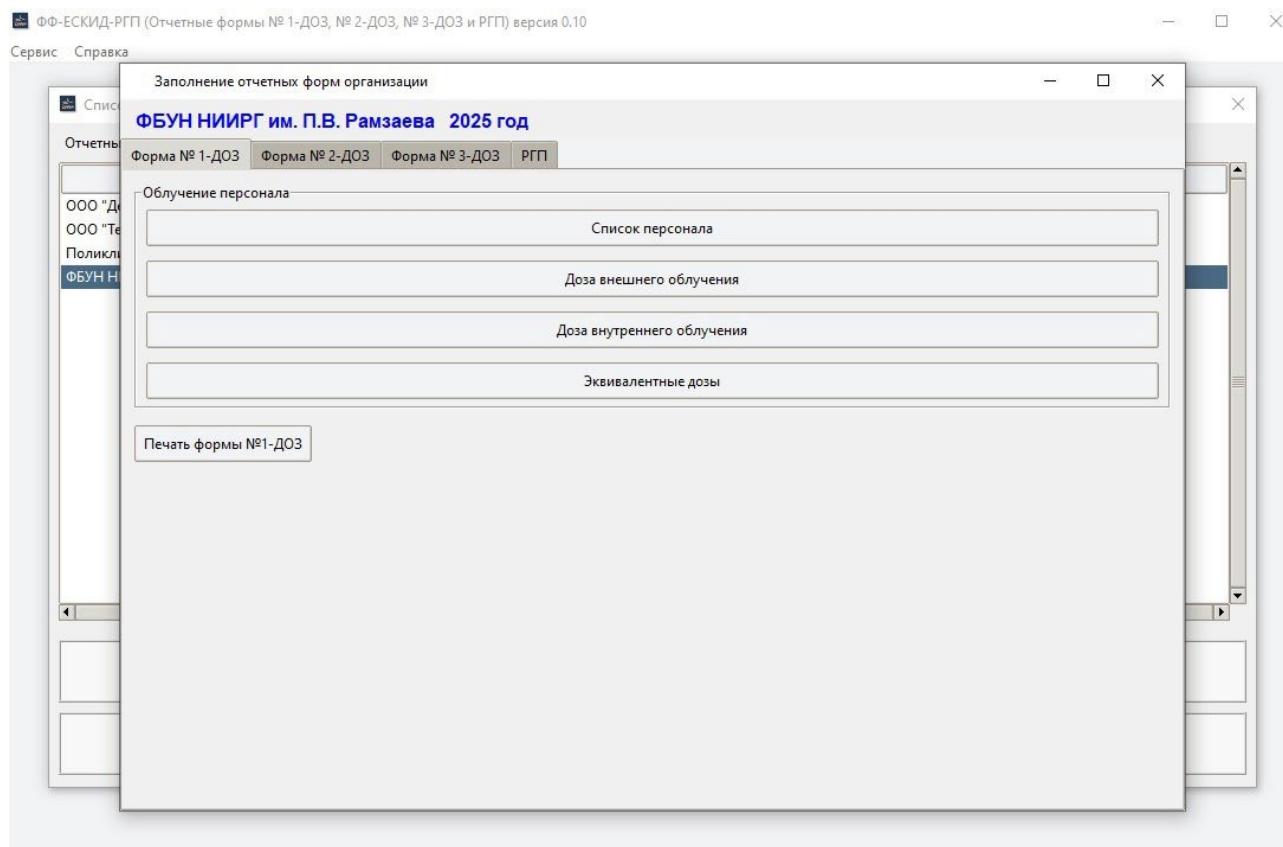


Рис. Интерфейс объединённого ПО ФФ-ЕСКИД-РГП

[Fig. Interface of the software for the Unified system of individual dose control of the citizens and radiation-hygiene passportization]

Заключение

Разработка современного ПО на основе Python и SQLite для формирования отчетных форм ЕСКИД и РГП является перспективным путем их развития на современном этапе. Новое ПО решает проблему устаревших технологий, обеспечивает интеграцию и согласованность данных, создает условия для развития ЕСКИД и РГП при незначительных материальных затратах. Внедрение данной разработки позволяет существенно упростить и повысить качество оценки влияния источников ионизирующего излучения на население Российской Федерации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Ахматдинов Руслан Р. осуществил разработку прототипа программного обеспечения, подготовил окончательный вариант рукописи.

Библин А.М. определил цели и задачи работы, подготовил промежуточный вариант рукописи.

Ахматдинов Рустам Р. редактировал промежуточный вариант рукописи.

Вишнякова Н.М. редактировала промежуточный вариант рукописи.

Благодарности

Авторы хотели бы отдать дань памяти Барышкову Николаю Константиновичу (23.12.1946 – 17.06.2025), разработчику ПО ЕСКИД и РГП, бесценному специалисту и прекрасному человеку. Без него функционирование ЕСКИД и РГП в Российской Федерации было бы невозможно.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения НИР «Развитие радиационно-гигиенической паспортизации как информационной основы комплексного анализа состояния радиационной безопасности в субъектах Российской Федерации и в России в целом с использованием методологии оценки радиационного риска для здоровья населения России и ГИС-технологий».

Литература

1. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД - информационная основа принятия управлеченческих 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.
2. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД - информационная основа принятия управлеченческих 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.
3. Онищенко Г.Г. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации по результатам радиационно-гигиенической паспортизации // Гигиена и санитария. 2009. № 3. С. 4-7.
4. Барковский А.Н., Кормановская Т.А., Водоватов А.В. и др. Формирование блока данных об уровнях облучения населения России для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 134-141. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-134-141.

Поступила: 24.10.2025

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

ORCID: 0009-0000-2300-6788

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

ORCID: 0000-0002-4151-5380

Вишнякова Надежда Михайловна – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; профессор, кафедра коммунальной гигиены, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0001-7165-4923

Для цитирования: Ахматдинов Руслан Р., Библин А.М., Ахматдинов Рустам Р., Вишнякова Н.М. О переработке программного обеспечения Единой системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан и радиационно-гигиенической паспортизации // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 157–161. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-157-161

Redesign of the software for the Unified system of individual dose control of the citizens and radiation-hygiene passportization**Ruslan R. Akhmatdinov¹, Artem M. Biblin¹, Rustam R. Akhmatdinov¹, Nadezhda M. Vishnyakova^{1,2}**¹ Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia² I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint Petersburg, Russia

Radiation dose monitoring and recording serve as an effective tool for ensuring the radiation safety of the population of the Russian Federation. The informational foundation for this monitoring and recording is

Ruslan R. Akhmatdinov

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

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

provided by the Unified system of individual dose control of the citizens and radiation-hygiene passportization of organizations and territories. The software for these systems was developed in the early 2000s and is now obsolete, both morally and technologically. The aim of this work is to identify possible approaches to improving the software. Materials and Methods: An analysis of the shortcomings of the existing software was conducted, and promising directions for its redesign were identified, taking into account economic, material-technical, and time constraints. Results and Discussion: A software prototype was developed using Python and SQLite. Conclusion: The developed prototype provides cross-platform compatibility, portability, the capability for integration with regional and federal databases, and a high level of information security.

Key words: radiation hygiene passportization, USCRID, software, radiation safety, Python, SQLite.

Authors' personal contribution

Akhmatdinov Ruslan R. developed the software prototype and prepared the final version of the manuscript.

Biblin A.M. defined the aims and objectives of the work and prepared the preliminary version of the manuscript.

Akhmatdinov Rustam R. edited the preliminary manuscript draft.

Vishnyakova N.M. edited the preliminary manuscript draft.

Acknowledgements

The authors wish to pay tribute to the memory of Nikolay Konstantinovich Baryshkov (23.12.1946 – 17.06.2025), the software developer of the USCRID ("ESKID") and the RGP. His invaluable expertise and dedication were foundational to the establishment and operation of the ESKID and the RGP systems in the Russian Federation.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was not supported by sponsorship. The study was performed within framework of research project "Development of radiation-hygienic passportization as an information basis for comprehensive analysis of the state of radiation safety in the subjects of the Russian Federation and in Russia as a whole using the methodology of radiation risk assessment for the health of the population of Russia and GIS-technologies".

References

1. Onishchenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1. Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 7-17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17.
2. Onishchenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun I.G. 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 Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 18-35. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35.
3. Onishchenko GG. The radiation environment in the Russian Federation according to the results of radiohygienic certification. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2009;(3): 4-7 (In Russian).
4. Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Vodovatov AV, Bratilova AA, Tutelyan OE, Biblin AM, et al. Management of data on the exposure of the Russian population for the State report on evaluation of sanitary-epidemiological well-being of the public in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 134-141. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-134-141.

Received: October 24, 2025

For correspondence: Ruslan R. Akhmatdinov – Research 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 (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: rusl.akh@niirg.ru)

ORCID: 0009-0000-2300-6788

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

Rustam R. Akhmatdinov – Lead Research 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: 0000-0002-4151-5380

Nadezhda M. Vishnyakova – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing; Professor of the Department of Hygiene of the conditions of education, training, labor and radiation hygiene of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0001-7165-4923

For citation: Akhmatdinov Ruslan R., Biblin A.M., Akhmatdinov Rustam R., Vishnyakova N.M. Software redesign for the Unified system of individual dose control of the citizens and radiation-hygiene passportization. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 157–161. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-157-161

80 лет атомной промышленности и роль радиационной гигиены

Большов Л.А., Линге И.И., Панченко С.В.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

В обзорно-постановочной статье рассмотрены основные вехи формирования эффективной и объемлющей все аспекты современной жизнедеятельности системы обеспечения радиационной безопасности человека в России, в том числе за счет создания независимых научных организаций. Становление атомной отрасли и разработка требований радиационной безопасности шло параллельно, опираясь как на отечественные исследования и разработки, так и, разумеется, на мировые тенденции и рекомендации в области нормирования. Сегодня можно смело констатировать, что в России функционирует надежная система обеспечения радиационной безопасности человека. Реальные дозы, даже оцененные консервативно, существенно ниже нормативных величин. Однако для повышения конкурентоспособности атомной отрасли требуется пересмотр некоторых положений основных нормативных актов в соответствии с последними международными подходами, чemu препятствуют не отвечающие современной ситуации требования Федерального закона от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности». Несмотря на многочисленные публикации и исследования, остаются нерешенными вопросы как в части установления производных показателей радиационной безопасности, так и основных пределов дозы. Остается проблема, связанная с отсутствием четко выработанных критериев применительно к необходимости проведения реабилитации территорий, а также критерии завершения работ по выводу из эксплуатации объектов наследия. В России все еще придерживаются принципа ограничения дозовых пределов, которые якобы основного предела доз, даже для ситуаций существующего облучения. В статье рассматривается проблема установленного ограничения по годовой эффективной дозе облучения критической группы населения при захороненииadioактивных отходов на уровне в 500–10000 раз ниже, чем рекомендуют международные организации, что в свою очередь не позволяет выстроить эффективную систему захоронения отходов, снижает темпы строительства пунктов захоронения и вывода из эксплуатации объектов наследия.

Ключевые слова: радиационная безопасность, дозы облучения, захоронение радиоактивных отходов, предел эффективной дозы облучения.

Введение

В 2025 году исполняется 80 лет атомной отрасли России. Появление атомной промышленности, а затем и атомной энергетики перевело вопросы радиационной безопасности (РБ) с уровня относительно рядовых в шеренге гигиенических дисциплин науки и практики в крупную государственную проблему, решением которой были заняты многие сотни ученых и специалистов различных отраслей науки. Самоотверженный труд этих специалистов и, в равной степени, специалистов в области ядерной техники позволил за несколько десятилетий перевести атомную промышленность в режим, при котором гарантируется надежное соблюдение требований безопасности работников и населения, в том числе в условиях радиационных аварий. Тематика крупных ядерных аварий уже рассматривалась нами [1], в связи с чем в данной статье не будет детально затронута. Целью статьи является рассмотрение основных вех становления системы радиационной безопасности, в том числе развилик, которые были пройдены с различной степенью успешности, и определение приоритетных задач будущего, среди которых и давно обсуждаемые проблемы.

Формирование системы обеспечения радиационной безопасности

Создание в 1946 году медицинской службы 1-го Главного управления при Совете Министров СССР, а затем

в 1947 году Третьего Главного управления при Минздраве СССР (ныне Федеральное медико-биологическое агентство (ФМБА России)) и базовых научных организаций – радиационной лаборатории (позже Институт биофизики с несколькими филиалами, а ныне Федеральное государственное бюджетное учреждение Государственный научный центр Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна ФМБА России), Научно-исследовательского института радиационной гигиены (сегодня – ФБУН НИИРГ им. П. В. Рамзаева), а несколько позднее НИИ гигиены морского транспорта и Института медико-биологических проблем Минздрава СССР – сформировало фундамент научной поддержки РБ профессиональных работников, в том числе атомной отрасли, экипажей атомного флота, включая его оборонные компоненты, и участников космических полетов, а также населения, в том числе проживающего в районах расположения объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) и в стране в целом. Практическую работу по РБ в атомной промышленности осуществляли медико-санитарные части и центры санэпиднадзора, а на остальной части страны – подразделения санитарных служб. Опытная научно-исследовательская станция на Южном Урале, а затем и ВНИИСХРАЭ в г. Обнинске отвечали за развитие научного потенциала в сельскохозяйственной радиологии. Существовавшая более столетия гидрометеорологическая служба осуществила работы по развертыванию системы

Линге Игорь Иннокентьевич

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

Адрес для переписки: 115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52; E-mail: linge@ibrae.ac.ru

контроля радиационной обстановки на территории страны. Завершающие шаги по формированию системы независимых научных организаций были сделаны уже после Чернобыля. Это создание в 1987 году Научно-технического центра по безопасности в атомной энергетике (сегодня – ФБУ «НТЦ ЯРБ») для решения задач научно-технической поддержки органа регулирования безопасности и нашего Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (далее – ИБРАЭ РАН), созданного распоряжением Совета Министров СССР от 3 ноября 1988 г. № 2198р, в целях расширения и углубления фундаментальных исследований, создающих основу для обеспечения безопасности атомной энергетики. Основная методология ИБРАЭ РАН — комплексный анализ безопасности атомных электростанций, включая ядерный топливный цикл, с использованием современных расчетных кодов.

На протяжении существования отрасли значительно менялись роли и приоритеты в сфере РБ. Не секрет, что в первые годы и десятилетия приоритет отдавался производственным задачам по созданию ядерного щита. С формированием современной системы регулирования безопасности при использовании атомной энергии ситуация радикальным образом изменилась. Органы регулирования стали в определенной степени ограничены только соблюдением регламентов рассмотрения и утверждения норм и правил, стали независимы от органов управления использованием атомной энергии в разработке норм и правил, регулирующих вопросы РБ. Единственным ограничением этой свободы осталась возможность своевременно возразить в рамках регламентов рассмотрения и утверждения норм и правил. Понятно, что это требование времени радикально изменило ситуацию и должно было способствовать соблюдению баланса между пользой,носимой атомной отраслью, и безопасностью населения.

Приверженность мировым тенденциям

Важно отметить, что с первых лет становления отрасли в научной базе вновь созданных организаций лежали не только собственные исследования и разработки, но и зарубежные данные, в том числе и непосредственная работа специалистов с мировым именем, среди которых были Н.В. Тимофеев-Ресовский, немецкие ученые К. Циммер и А. Кач. В последующие десятилетия ведущие ученые СССР и России активно участвовали в работе таких международных органов, как МКРЗ, НКДАР ООН. Среди них необходимо отметить таких ярких ученых, как П.В. Рамзаев, Л.А. Ильин, Р.М. Алексахин. В особой мере научное сотрудничество с зарубежными специалистами развернулось после аварии на Чернобыльской АЭС при реализации таких международных проектов, как Международный чернобыльский проект, проекты ТАСИС, Франко-германская инициатива для Чернобыля.

В целом, для истории обеспечения РБ в России было характерно следование мировым тенденциям в области нормирования. Это было эволюционное развитие подходов, подкрепленное нарастающим опытом в части РБ работников в атомной промышленности. Введение так называемых толерантных доз сопровождалось практическим нащупыванием допустимых суточных и недельных доз облучения. Переход к нормированию эквивалентной дозы состоялся уже в существенно лучших условиях радиационной обстановки. При этом пределы доз не всегда считались незыблеблемым догматом. Ярким примером взвешенного подхода стали исследования специалистов НИИРГ повышенного облучения оленеводов в западных районах Крайнего Севера вследствие глобальных выпадений в [2]. Изначальная идея рекомендации о переводе оленеводства в восточные районы была радикально пересмотрена после установления одинакового (на уровне порядка) загрязнения во всех районах Крайнего Севера. Важным обстоятельством этого исследования является употребление понятия опасности в кавычках с упоминанием того, что нет оснований для интерпретации присутствия в организме оленеводов ^{137}Cs на уровне 3-4 мКи как неприемлемого фактора риска. Примером иного рода являются аварийные ситуации, в которых просто требуется установление более высоких значений дозовых пределов, как это было после аварии на ЧАЭС. Переход к эффективной дозе, в рамках НРБ-96, также состоялся вследствие ориентации на международные подходы, несмотря на негативные последствия в части контроля внутреннего облучения персонала радиохимических производств. В настоящее время ситуация с профессиональным облучением работников атомной отрасли иначе как благополучной охарактеризована быть не может, поскольку средние годовые дозы облучения работников достаточно стабильны и лежат в диапазоне менее 1,5 мЗв [3]. Коллективная доза возрастает очень небольшими темпами, несмотря на ввод в эксплуатацию новых ОИАЭ и увеличение количества работников. А самое главное – случаи превышения допустимых пределов либо отсутствуют, либо носят единичный характер, что при количестве работников порядка 70 тыс. человек является рекордным показателем в сфере охраны труда. Можно констатировать, что создана надежная система, в рамках которой вопросы РБ регулярно рассматриваются на отраслевых совещаниях. При этом ситуация не является безоблачной, специалистами отрасли отчетливо сформулирован запрос [4] на приведение российской нормативно-правовой базы в соответствие международным подходам. Основным препятствием к этому является текущее состояние базового Федерального закона от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» (далее – ФЗ), который не дает возможности для пересмотра основных нормативных правовых актов, в первую очередь СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)»¹ и СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2009)»².

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09. «Санитарные правила и нормативы. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» (утв. постановлением главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47). М., 2009. 100 с. [SanPiN 2.6.1.2523-09. "Sanitary rules and regulations. Radiation safety standards NRB-99/2009" (approved by the resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated July 7, 2009, No. 47). Moscow; 2009. 100 p. (In Russ.)]

² СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)», утвержденные Главным Государственным санитарным врачом Российской Федерации 26 апреля 2010 г. (зарегистрированы в Минюсте России 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115). [SP 2.6.1.2612-10 "Basic Sanitary Rules for Ensuring Radiation Safety (OSPORB-99/2010)", approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on April 26, 2010 (registered with the Ministry of Justice of Russia on August 11, 2010, registration No. 18115) (In Russ.)]

Закон о радиационной безопасности и нормы радиационной безопасности

В настоящее время ФЗ представляет собой редкий феномен наиболее стабильного законодательного акта Российской Федерации. Несмотря на позиции различных сообществ и комиссий, заявленные 20 и более лет тому назад, закон остается неизменным в своих основных положениях. В конце прошлого десятилетия казалось, что согласие профессионального сообщества достигнуто. В особой мере это проявлялось в решениях Научно-технического совета № 10 «Экологическая и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом» (далее – НТС) периода 2018–2022 гг. Важно, что в обсуждениях на НТС принимали активное участие специалисты предприятий отрасли, научных организаций Роспотребнадзора, ФМБА России и РАН. Выработка рационального подхода, предусматривавшего совместное решение задач модернизации НРБ и ФЗ (декабрь 2018 года), последовавшие за этим обсуждения состояния разработки НРБ (декабрь 2019 года), критическое рассмотрение проекта изменений, обсуждение нового законопроекта (октябрь 2021 года), работы над ним (июнь 2022 г.), фиксация предвестников прогресса в этой кропотливой работе (декабрь 2022 г.) закончились ничем, если не считать публикации проекта обновленного ФЗ и сопроводительного письма в Роспотребнадзор от 2022 года. В этой связи опять возникает вопрос о необходимости данного закона, который уже поднимался в 2002 году и обосновывался нашими специалистами в 2020 году [5]. Сегодня, когда основные заинтересованные организации Госкорпорации «Росатом», а это были, в первую очередь, организации, участвующие в сооружении АЭС за рубежом, основные свои проблемы решили, а иные – организации атомного энергопромышленного комплекса – уже привыкли к двойственному

статусу НРБ и ОСПОРБ, может сложиться впечатление, что застойное состояние вопроса уже перестало волновать специалистов, но это не так.

О производных показателях РБ

Издергки в части установления производных показателей РБ оказались еще большими, чем для основных пределов дозы. Наиболее интересная ситуация с радионуклидом ^{90}Sr , к которому, наравне с ^{137}Cs , было привовано основное внимание специалистов по обеспечению РБ фактически с самого начала использования атомных технологий. Следствием этого внимания стало огромное число работ в мировой научной литературе по физико-химическим свойствам соединений этих нуклидов, их поведению в окружающей среде и метаболизму в человеческом организме. Тем не менее, динамика изменений ПДК в воде в СССР и России (рис. 1) демонстрирует отсутствие выраженной преемственности. В наибольшей мере это проявилось при установлении так называемой стронциевой единицы в 1957 году после Кыштымской аварии. Её установление на значениях более «жестких», чем современные нормативы привело к увеличению доли бракеража сельхозпродукции и к неоправданному переселению жителей³. Указанные отличия в нормировании цезия и стронция сохранились до Чернобыльской аварии. Однако после аварии на ЧАЭС ситуация резко поменялась: начиная с НРБ-96 отличия в ПДК снизились с 30 до 2 раз. При расчете доз на население до настоящего времени в Российской Федерации не приняты рекомендации МАГАТЭ [7] и расчет ведется на критическую группу населения, хотя параллельно используются дозовые коэффициенты из этих рекомендаций для различных возрастных групп населения.

Для обсуждаемых радионуклидов эти коэффициенты приведены в таблице.

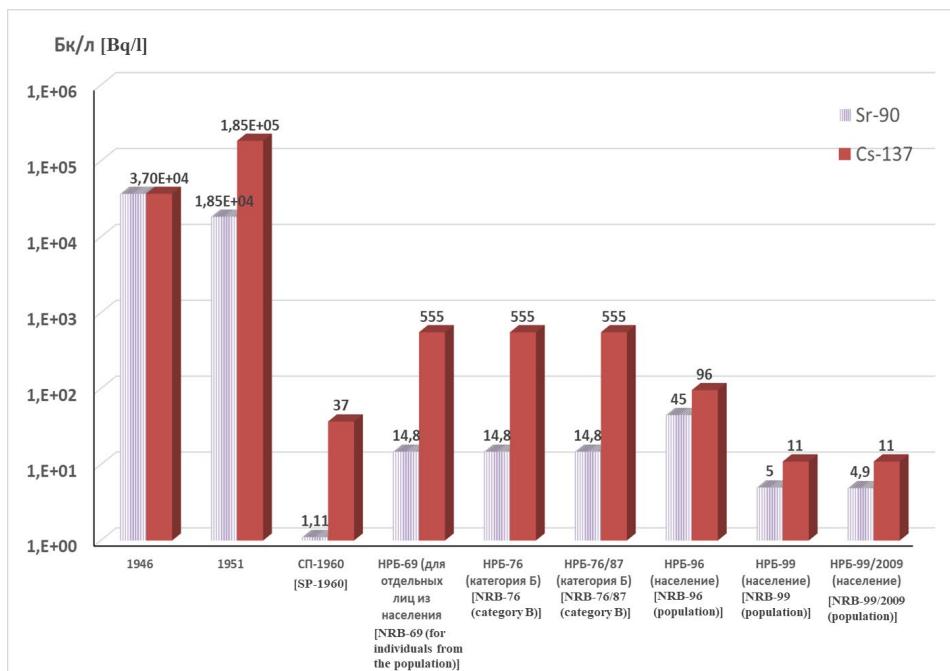


Рис. 1. Нормативы на ^{90}Sr и ^{137}Cs в питьевой воде в отечественных нормативных документах
[Fig. 1. Standards for ^{90}Sr and ^{137}Cs in drinking water according to domestic regulations]

³ СП-1960. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. Министерство Здравоохранения СССР, Москва: Госатомиздат, 1960. [SP-1960. Sanitary Rules for Working with Radioactive Substances and Sources of Ionizing Radiation. USSR Ministry of Health, Moscow: Gosatomizdat; 1960 (In Russ.)]

Дозовые коэффициенты для различных возрастных групп при пероральном поступлении, Зв/Бк [6]

[Table]

Dose coefficients for different age groups in case of oral intake, Sv/Bq [6]

Нуклид [Nuclide]	Возрастная группа, годы [Age group, years]					
	< 1	1–2	2–7	7–12	12–17	> 17
⁹⁰ Sr	2,30E-07	7,30E-08	4,70E-08	6,00E-08	8,00E-08	2,80E-08
¹³⁷ Cs	2,10E-08	1,20E-08	9,60E-09	1,00E-08	1,30E-08	1,30E-08
⁹⁰ Sr/ ¹³⁷ Cs	11,0	6,1	4,9	6,0	6,2	2,2

Видно, что для старшей возрастной группы отношение дозовых коэффициентов идентично нормам радиационной безопасности – НРБ-99/2009. Но это находится в контрасте с декларируемой НРБ-99/2009 целью о том, что дозы оцениваются для критической группы населения. Хорошо видно, что как для ¹³⁷Cs, так и особенно для ⁹⁰Sr возрастная группа (более 17 лет) не является критической.

Последние годы мы живем обещаниями, что в новых НРБ также учат эти рекомендации наряду с некоторыми другими новациями, появившиеся еще в 103 Публикации МКРЗ [8].

Дозы облучения в сравнении с другими факторами воздействия на здоровье и дозовые ограничения при захоронении РАО

Доза облучения персонала и населения ежегодно публикуются в радиационно-гигиенических паспортах [8]. Несмотря на достаточно размытую и далеко не полную картину о радиационной ситуации в стране, основные тенденции явственно прослеживаются. Основная доза формируется за счет естественных источников облучения, существенна и имеет тенденцию к росту дозы от медицинского облучения, а дозы от техногенных источников неуклонно снижаются.

Что касается облучения населения природными источниками, то результаты выполнения ФЦП ЯРБ-1 показали исключительную пестроту значений, когда средние дозы для отдельных групп населения за счет радона доходили до нескольких десятков мЗв/год при среднем значении в 2 мЗв [8].

Стало понятным, чтобы существенно повлиять на эту составляющую радиационного воздействия на население, требуется разработка специального инструментария. Однако дальнейшее продолжение работ по ограничению облучения населения природными источниками, к нашему сожалению, не вошло в ФЦП ЯРБ-2.

Всем мире, в том числе и в нашей стране, все более широкое применение в медицине находят ядерные технологии. Понятно, что бессмысленно ограничивать лечебные процедуры по мощности дозы, тут все решает врач, но и учитывать эти дозы в общероссийской статистической отчетности, если и следует, то отдельно от массовых диагностических обследований.

Парадоксально, но именно в области ограничения самых маленьких по вкладу – техногенных – доз облучения ведется основная нормотворческая деятельность. С одной стороны, это вроде бы и понятно, производство электроэнергии демонстрирует неуклонное снижение дозовых нагрузок и на персонал, и, еще в большей степени, на население и дает возможность надзорным органам по различным мотивам ужесточать степень радиационного воздействия, не очень обращая внимание на другие факторы воздействия на здоровье населения. Именно о таком непропорциональном внимании говорил еще в 60-е годы П. В. Рамзаев [9] и ряд ведущих гигиенистов страны, но они не были услышаны; более того, ситуация все более усугубляется (см. рис. 2).



Рис. 2. Сравнение рисков воздействия техногенных факторов различной природы на здоровье жителей г. Ангарска [11]

[Fig. 2. Comparison of risks associated with anthropogenic factors of various origins for the Angarsk residents and their health [11]]

Видно, что тепловая энергетика, работающая на угле, оказывает на порядок большее только радиационное воздействие, чем предприятие атомной промышленности, но химические факторы многократно превышают риски радиационной природы.

В настоящее время в области нормирования химического воздействия параллельно действуют два подхода: нормирование по ПДК (предельно допустимая концентрация) и по риску. Между этими величинами существует разрыв в 6 порядков величины (рис. 3), с которым, по-видимому, надзорные органы не знают, что делать, и потому бездействуют.

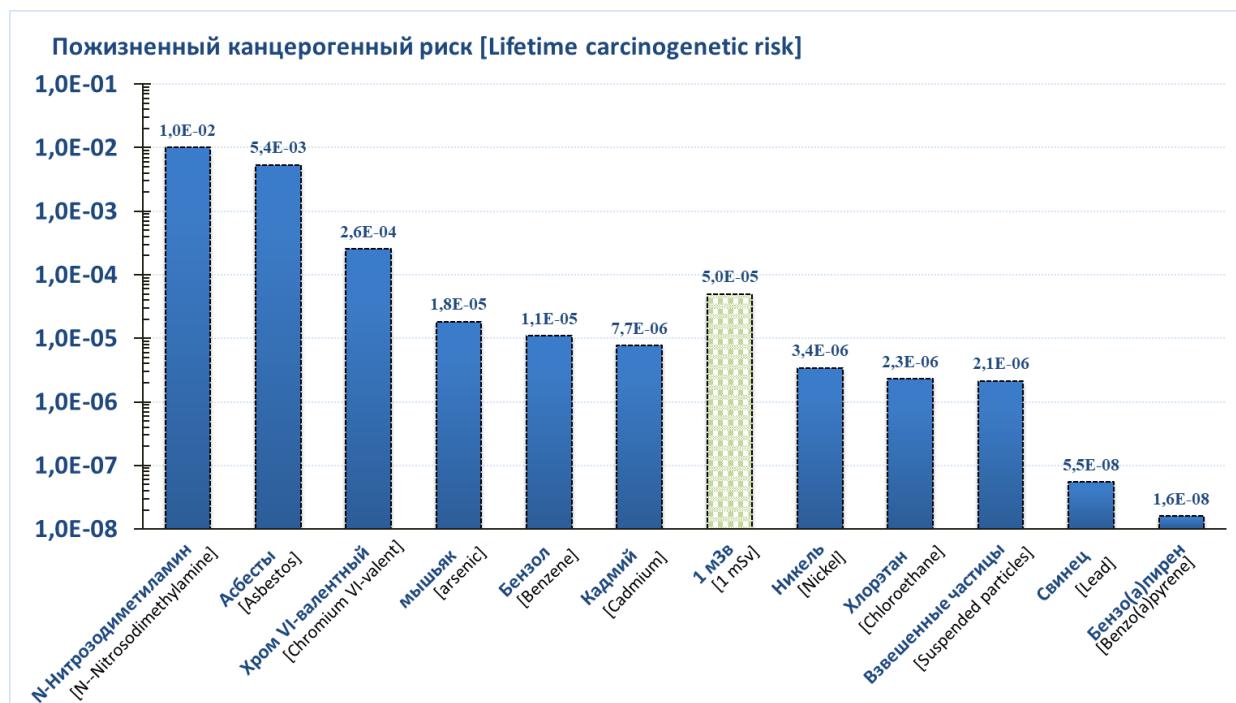


Рис. 3. Пожизненный канцерогенный риск ингаляционного воздействия при годовой экспозиции на уровне ПДК химических веществ в сравнении с радиационным фактором [12]

[Fig. 3. Lifetime carcinogenic risk of inhalation exposure with annual exposure at the MPC level of chemicals in comparison with the radiation factor [12]]

Между прочим, основной дозовый предел как фактор канцерогенного воздействия по действующим завышенным оценкам риска находится посередине всего диапазона канцерогенов. Можно также обратить внимание, что «общественно значимые» канцерогены, такие как свинец и бенз(а)пирен имеют самые жесткие ПДК. Здесь явно прослеживается влияние формируемого информационного поля, которое, как мы знаем, в немалой степени затрагивает и радиационный фактор.

О дозовых критериях применительно к эксплуатируемым ОИАЭ можно сказать, что они не только обеспечивают безопасность населения с большим запасом, но и позволяют конкурировать на мировом рынке. В топливно-энергетическом комплексе помимо норм существует достаточно эффективный контроль за реальным облучением персонала и населения. И как уже было отмечено, реальные дозы, даже оцененные консервативно, существенно ниже нормативных величин.

Вместе с тем, как уже неоднократно отмечалось [11], остается проблема, связанная с отсутствием четко выработанных критериев применительно к необходимости проведения реабилитации, а также критерии завершения работ по выводу из эксплуатации ОИАЭ, что создает практические трудности при ранжировании радиационно загрязненных территорий, планировании и проведении практических мероприятий, число которых неуклонно растет. Реабилитация,

на наш взгляд, всегда адресована ситуации существующего облучения, в которой, согласно Международным основным стандартам безопасности [6], принятие решений лежит в диапазоне доз облучения 1–20 мЗв/год. Международная комиссия по радиологической защите в Публикации 103 МКРЗ [7] рекомендует, чтобы в ситуациях существующего облучения референтные уровни, установленные по индивидуальной дозе, использовались в сочетании с внедрением процесса оптимизации. На практике у нас до настоящего времени придерживаются исключительно принципа ограничения дозовых пределов, которые жестче основного предела доз.

Радиоактивные отходы (РАО) и дозы облучения при захоронении РАО

В отношении РАО нам представляются безусловно справедливыми как минимум два тезиса. Первый: атомная энергетика уже доказала свою высокую, но не абсолютную безопасность [14], но в любой конфигурации (открытый и закрытый ядерный топливный цикл) она будет генерировать радиоактивные отходы. Состав отходов будет разным: в случае открытого топливного цикла – отработавшее ядерное топливо и РАО, а при закрытом топливном цикле – только РАО. Их цивилизованное захоронение обеспечит радиационную и экологическую безопасность населения в существенно большей степени, чем при использовании иных источников энергии. Второй: историческая роль радиационной гигиены

в обеспечении персонала при обращении с РАО глубоко положительна, но полной синхронизации действий в отношении развития Единой государственной системы обращения с РАО (ЕГС РАО) пока не достигнуто [14]. Приведем несколько примеров.

Во-первых, это критерии отнесения к РАО. Научно необоснованные предложения по критериям отнесения к РАО, содержащиеся в ОСПОРБ-99, ушли в прошлое. Некоторые из огрехов первых критериев, установленных уже в 2012 году, в рамках ЕГС РАО также устраниены. Но действующие и до, и после 1 января 2024 года критерии отнесения отходов к РАО также являются чрезвычайно упрощенными. В первую очередь это касается отходов, содержащих очень короткоживущие радионуклиды, в отношении которых постановка вопроса о захоронении и даже классификации их как РАО более чем проблематична. В этом же ряду вопросы обращения с радиоактивными материалами, образующимися при применении радиофармпрепаратов и ряд иных [15]. Не менее интересна ситуация с критериями отнесения газообразных отходов к РАО. Их установление на уровне допустимой объемной активности в воздухе для населения ($\text{ДОА}_{\text{нac}}$) не дает никаких решений для практики обращения, но порождает коллизии, которые по какой-то причине остаются за рамками объективной оценки. Попытки резкого снижения уровня отнесения твердых отходов к РАО также предпринимались и в 2012 году, и в период 2019–2020 гг. Критерии классификации РАО для захоронения, установленные в 2012 году, имели выраженные дефекты, связанные с природой происхождения численных значений удельной активности. Предназначенные для обеспечения радиационной безопасности персонала они были механически перенесены для задачи обеспечения безопасности захораниваемых РАО, что принципиально неправильно, поскольку они обрекали на захоронение короткоживущих РАО в пунктах захоронения с барьерами безопасности, обеспечивающими изоляцию на сотни и тысячи лет. Важно, что эту ошибку удалось частично исправить, новые критерии классификации РАО для захоронения вступили в силу 1 января 2024 года. Перечень различного рода шероховатостей, характерных для документов радиационно-гигиенического нормирования, хорошо известен и неоднократно обсуждался [16].

Остановимся только на вопросе ограничения допустимого радиационного воздействия при захоронении РАО. Публикация 103 МКРЗ [7] и нормы безопасности МАГАТЭ [6] рекомендуют для захоронения РАО следующие значения граничных доз: 0,3 мЗв/год для базовых сценариев и 5 мЗв для альтернативных. Речь идет о дозах не только на современные поколения людей, но и на облучение предполагаемого населения через сотни тысяч лет, а согласно некоторым нашим нормам, и через миллионы лет, когда существование самой планеты будет находиться под большим вопросом. При этом вводятся ограничения более серьезные, чем для ныне живущих поколений. Разумного объяснения этому нет. Принципы обоснования, рекомендуемые международным сообществом и закрепленные в наших отечественных НРБ, полностью игнорируются. И вот уже отталкиваясь от так и не получившего научного обоснования основного дозового предела в 5 мЗв за 5 лет, появляются новые нормы в 10 и в 100 раз более жесткие, за которыми стоит не глубокое научное обоснование, а чистый волюнтаризм, прикрытый якобы гуманистическими началами.

Говоря о дозах облучения человека при захоронении РАО, следует отметить, что тематику безопасности захоронения РАО мы неоднократно и детально рассматривали, поскольку ИБРАЭ РАН определен научным руководителем по глубинному и приповерхностному захоронению РАО классов 1–4. Проблемность темы обусловлена многими сложными вопросами, в том числе уровнем доверия к долгосрочным прогнозам [17]; но есть вопросы более простого порядка, в том числе из области гигиенических правил. Они, в первую очередь касаются пункта 3.12.19. ОСПОРБ, согласно которому годовая эффективная доза облучения критической группы населения за счет РАО после их захоронения не должна превышать 0,01 мЗв. Несмотря на простоту вопроса о правомерности подобного требования упомянем, что защита будущих поколений – это принципиальная экологическая норма, имеющая свою формулировку и в применении к тематике захоронения РАО в статье 1 Объединенной конвенции [19]. Конкретно в ней указано, что конвенция предназначена обеспечить «защиту отдельных лиц, общество в целом и окружающую среду от вредного воздействия ионизирующих излучений в настоящее время и в будущем таким образом, чтобы нужды и чаяния нынешнего поколения удовлетворялись без ущерба для возможности будущих поколений реализовывать свои нужды и чаяния». Наши представления о далеком будущем вполне туманны, следствием чего в сценарном плане доминирует представление о фермере, ведущем натуральное хозяйство. С учетом изложенного возникает вопрос – должен ли такой фермер быть более защищенным, чем нынешнее поколение. И не нужно ли для таких требований предполагать два сценария эволюции объекта захоронения. По нашему убеждению – да, мы не должны накладывать чрезмерные требования к объектам захоронения РАО в ущерб нынешнему поколению и должны ориентироваться на сценарии нормальной эксплуатации (для ПЗРО это базовый сценарий эволюции) и аварии (для ПГЗРО это альтернативные сценарии). В будущем, в случае захоронения РАО наиболее тяжелые последствия связаны с альтернативными сценариями с вмешательством в систему захоронения. Именно этот подход и реализуется в международной практике, где для случая развития альтернативного сценария ограничения по годовой эффективной дозе облучения критической группы населения лежат в диапазоне от ≈ 5 до 100 мЗв [21], то есть на уровне в 500 – 10000 раз более высоком, чем предусмотрено ОСПОРБ. Отсутствие дискуссий по этому вопросу в предшествующие десятилетия связано исключительно с отсутствием практики создания пунктов захоронения. Теперь, когда ситуация принципиально изменилась, обсуждаемую норму необходимо менять и переходить к дифференцированному подходу, в том числе более аккуратному, чем рекомендуется на международном уровне. Причины этого просты – в Российской Федерации накопленных и до настоящего времени не захороненных РАО больше всех в мире. И создавать препятствия для их захоронения более чем странно. Поэтому целесообразно использование дозового ограничения как минимум в 1 мЗв/год на период, когда имеющиеся неопределенности по моделируемым процессам незначительны (до ~ 300 лет) и порядка 10 мЗв/год на более долгосрочный период для базового сценария эволюции ПЗРО. На более долгосрочный период для альтернативных сценариев целесообразно остановиться на еще больших величинах, вплоть до 100 мЗв.

Заключение

Гигиенические регламенты сыграли решающую роль в становлении системы РБ в промышленности и эволюционном повышении РБ населения. В настоящее время дозы облучения профессиональных работников и населения, обусловленные эксплуатацией ОИАЭ, в подавляющем большинстве случаев находятся в комфортном диапазоне 2-3 кратного запаса от установленных пределов, а случаи превышения единичны.

Общее состояние дел в сфере обеспечения РБ нельзя признать благополучным по нескольким причинам:

1. Базовый закон о РБ, равно как и вся система нормативных документов, нуждаются в модернизации. Наиболее заинтересованные стороны в этой модернизации – службы РБ и специалисты атомной отрасли.

2. При условном благополучии в сфере РБ при использовании атомной энергии, иные компоненты облучения – облучение от радона и его дочерних продуктов и от медицинских диагностических процедур – занимают все большую долю в структуре облучения населения (первая – скорее вследствие полноты оценки, вторая – за счет фактического роста). Задача предотвращения этого процесса, то есть роста абсолютных доз облучения населения России, существенно сложнее решаемых задач по предотвращению облучения от объектов наследия и действующих производств атомной энергетики и промышленности. Она требует системных мер в области градостроительной деятельности и здравоохранения, которые необходимо выработать. Возможно, помогут и меры информационного характера. Ими могли бы стать национальные наставления по РБ, изложенные от максимально широкого круга специалистов в максимально доступной форме.

3. В сфере регламентации облучения от ОИАЭ осталось совсем немного проблемных зон, среди которых есть очень простые по способам решения (среди них все вопросы обращения с РАО) и лишь несколько предельно сосредоточенных по производствам и методам решения (внутренне облучение на новых производствах, облучение хрусталика глаза и пр.), которые могут быть частично решены в короткие сроки, но полностью – только при существенном снижении участия человека в производственных процессах за счет автоматизации и роботизации.

4. Десятилетия существовавшая многобарьерная граница между деятельностью по обеспечению РБ работников отдельных отраслей и проживающего вблизи ОИАЭ населения и основного населения страны становится все более призрачной. Это создает предпосылки для более тесного сотрудничества специалистов Роспотребнадзора, ФМБА и иных заинтересованных организаций.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Большов Л.А. – разработка концепции статьи и её разделов по рассмотрению проблематики на НТС № 10 «Экологическая и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом», согласие принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Линге И.И. – написание разделов статьи в части текущих уровней состояния радиационной безопасности, общее редактирование.

Панченко С.В. – сбор и систематизация данных и напи-

сание фрагментов по историческим аспектам радиационной безопасности.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Большов Л.А., Арутюнян Р.В., Линге И.И., Абалкина И.Л. Ядерные аварии: последствия для человека, общества и энергетики // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 43–52. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-43-52.
2. Избранные материалы «Бюллетеня радиационной медицины». М.: ФГБУ ГНЦ ФМБА им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2016. С. 70–76.
3. Панфилов А.П. Исторические аспекты создания и развития основных объектов атомной отрасли страны. Радиационное воздействие на персонал в разные периоды времени // Журнал «АНРИ». 2020. № 3. С. 3–25. DOI: 10.37414/2075-1338-2020-102-3-3-25.
4. Решение отраслевого научно-практического семинара «Радиационная безопасность в атомной отрасли 28.07.2025-1.08.2025». Иркутск: Письмо Госкорпорации «Росатом» от 01.08.2025.
5. Веденникова М.В., Линге И.И., Панченко С.В. и др. Актуальные вопросы внесения изменений в Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». Препринт № IBRAE-2020-03. М.: ИБРАЭ РАН, 2020. 22 с. ISBN 978-5-6041296-5-4.
6. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. № GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 471 р.
7. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. М.: 2009. 343 с.
8. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2023 году. Справочник. Санкт-Петербург, 2024.
9. Романович И.К. Актуальные задачи радиационной гигиены в свете итогов ФЦП ЯРБ. Материалы юбилейной X Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». М.: 2015. С. 97–110.
10. Бурназян А.И. Рамзаев П.В., Моисеев А.А. Перспективы радиационной гигиены // Гигиена и санитария. 1969. № 10. С. 8–14.
11. Аракелян А.А. Комплексный метод обоснования радиационной безопасности и экологической приемлемости объектов ядерной техники. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. М., 2024. С. 144.
12. Панченко С.В., Новиков С.М., Шашина Т.А., Аракелян А.А. Ранжирование радиационных и химических рисков для здоровья населения, проблемы и пути решения. «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность–2018». Сборник статей междунар. науч.-практ. конф. 24 – 27 сентября 2018 г. Севастополь, 2018. 1315 с.
13. Абалкина И.Л., Панченко С.В., Савкин М.Н. и др. Социально и экологически приемлемые критерии реабилитации загрязненных территорий пунктов размещения особых радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 3. С. 46–52.
14. Линге И.И., Уткин С.С. Радиационные и экологические аспекты атомной энергетики будущего // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 5. С. 113–121. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-113-121.

15. Линге И.И. О роли вопросов радиационной гигиены в развитии системы обращения с радиоактивными отходами. В сборнике: Актуальные вопросы радиационной гигиены. материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 2023. С. 198–202.
16. Наркевич Б.Я. Актуальные вопросы обращения с радиоактивными отходами в ядерной медицине // Радиоактивные отходы. 2022. № 1 (18). С. 28–37. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-28-37.
17. Линге И.И. О рационализации систем обращения с РАО и обеспечения радиационной безопасности // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 21–34. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-21-34.
18. Абалкина И.Л., Большов Л.А., Капырин И.В. и др. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние. Препринт ИБРАЭ № 2019-03. М: ИБРАЭ РАН, 2019. 40 с.
19. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Вена, 5 сентября 1997 г. С. 42. URL: (https://www.iaea.org/sites/default/files/infocirc546_rus.pdf). (Дата обращения 22.10.2025).
20. Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste. ICRP Publication 122 // Annals of the ICRP. 2013. Vol. 42, No 3.

Поступила: 29.09.2025

Большов Леонид Александрович – академик Российской академии наук, профессор, доктор физико-математических наук, научный руководитель, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

Линге Игорь Иннокентьевич – доктор технических наук, советник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. **Адрес для переписки:** 115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52; E-mail: linge@ibrae.ac.ru

ORCID: 0009-0004-3206-8752

Панченко Сергей Владимирович – старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-2750-0940

Для цитирования: Большов Л.А., Линге И.И., Панченко С.В. 80 лет атомной промышленности и роль радиационной гигиены // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 162–170. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-162-170

80 years of nuclear industry and the role of radiation hygiene

Leonid A. Bolshov, Igor I. Linge, Sergey V. Panchenko

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

This overview article examines the key milestones in the development of an effective system for radiation safety in Russia covering all aspects of modern life, including through the establishment of independent scientific organizations. Evolution of nuclear industry and the development of radiation safety requirements proceeded in parallel drawing both on national research and development and, of course, global trends and recommendations in the field of standardization. Today, it can be confidently stated that Russia operates a reliable system providing radiation safety of people. Actual doses, even when estimated conservatively, are much lower than the regulatory limits. However, certain revision of some key regulations in line with the latest international approaches is required to enhance the competitiveness of nuclear industry, which is hindered by the requirements of the Federal Law No. 3-FZ On Radiation Safety of January 9, 1996 no longer corresponding to present day developments. Despite numerous publications and studies, some issues remain unresolved regarding both the establishment of derived radiation safety indicators and the fundamental dose limits. Another persisting problem is related to the lack of clearly defined criteria based on which the necessity of site remediation can be declared, as well as end-state criteria for decommissioned nuclear legacy facilities. Russia still adheres to the principle of dose limits that are stricter than the basic dose limit even in case of existing exposure. This article addresses the problem of the annual effective dose limit set for the critical group of population in the context of radioactive waste disposal; the limit is between 500 and 10,000 times lower than the one recommended by international organizations. This, in turn, hinders the development of an

Igor I. Linge

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences

Address for correspondence: 52, Bolshaya Tulskaya Str., Moscow, 115191, Russia; E-mail: linge@ibrae.ac.ru

effective waste disposal system, slows down the construction of disposal facilities and the decommissioning of legacy facilities.

Key words: radiation safety, radiation doses, radioactive waste disposal, effective dose limit.

Authors' personal contribution

Bolshov L.A.developed the article concept and its sections on the topic at Scientific and Technical Council No. 10 "Environmental and Radiation Safety" of the Rosatom State Corporation; agreed to assume responsibility for all aspects of the work.

Linge I.I. wrote the article sections on current radiation safety levels; provided general editing.

Panchenko S.V. collected and systematized data and wrote sections on the historical aspects of radiation safety.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. Bolshov LA, Arutyunyan RV, Linge II, Abalkina IL. Nuclear Accidents: Consequences for Human, Society and Energy Sector. *Radiatsionnaya gygiена = Radiation Hygiene*. 2016;9(3): 43–52. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-43-52.
2. Selected Materials of the Bulletin of Radiation Medicine. Moscow: A.I. Burnasyan FMBC Publ.; 2016. P. 70–76. (In Russian).
3. Panfilov A. Historical Aspects of the Creation and Development of the Main Facilities of the Country's Nuclear Industry. Radiation Exposure to Personnel in Different Time Periods. *ANRI = ANRI*. 2020;3: 3–25. (In Russian).
4. Decision of the industry scientific and practical seminar "Radiation Safety in the Nuclear Industry" 28.07.2025-1.08.2025. Irkutsk: Letter of the State Corporation Rosatom dated 01.08.2025. (In Russian).
5. Vedernikova MV, Linge II, Panchenko SV, Strizhova SV, Supotaeva OA, Utkin SS. On the issue of amendments to the Federal Law of January 9, 1996 No.3-FZ "On radiation safety of population". (Preprint Nuclear Safety Institute RAS, № IBRAE-2020-03). Moscow: Nuclear Safety Institute RAS; 2020. 22 p. ISBN 978-5-6041296-5-4. (In Russian).
6. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. № GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2014. P. 471.
7. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4). (In Russian).
8. Radiation Situation in the Russian Federation in 2023. Handbook. St. Petersburg; 2024. (In Russian).
9. Romanovich IK. Actual Tasks in Radiation Hygiene in the Context of FTP NRS Results. Proceeding of the Jubilee X Russian Scientific Conference «Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies». Moscow; 2015. P. 97–110. (In Russian).
10. Burnazyan AI, Ramzaev PV, Moiseev AA. Prospects for Radiation Hygiene. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, 1969;10: 8-14. (In Russian).
11. Arakelyan AA. A Comprehensive Method for Safety assessment the Radiation Safety and Environmental Acceptability of Nuclear Facilities. A PhD dissertation. Moscow; 2024. P. 144. (In Russian).
12. Panchenko SV, Novikov SM, Shashina TA, Arakelyan AA. Ranking of radiation and chemical risks to public health, problems and solutions. "Environmental, industrial and energy safety - 2018". Collection of articles from the international scientific and practical conference, September 24-27, 2018. Sevastopol; 2018. 1315 p. (In Russian).
13. Abalkina IL, Panchenko SV, Savkin MN, Vedernikova MV, Kryshev II. Socially and Ecologically Acceptable Criteria for Remediation of Contaminated Areas of Non-Retrievable Waste Facilities. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2017;87(3): 46–52. (In Russian).
14. Linge II, Utkin SS. Radiation and Environmental Aspects of Advanced Nuclear Energy. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(5): 113-121. (In Russian). DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-113-121.
15. Linge II. On the Role of Radiation Hygiene in the Development of Radioactive Waste Management Systems. In: Current Issues in Radiation Hygiene. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. St. Petersburg; 2023. P. 198-202. (In Russian).
16. Narkevich BYa. Current Radioactive Waste Management Challenges in Nuclear Medicine. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*. 2022;1(18): 28–37. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-28-37.
17. Linge II. Streamlining RW management and radiation safety systems. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*. 2023;2(23): 21–34. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-21-34.
18. Abalkina IL, Bolshov LA, Kapyrin IV, Linge II, Saveleva EA, Svitelman VS, et al. Radioactive waste and spent nuclear fuel deep geological disposal long-term safety assessment for 10 000 years and over: methodology and current state. Preprint IBRAE-2019-03. Moscow: Nuclear Safety Institute; 2019. 40 p. (In Russian).
19. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. International Atomic Energy Agency. Vienna; 1997. P. 36. Available from: https://www.iaea.org/sites/default/files/infci_rc546.pdf [Accessed October 22, 2025]. (In Russian).
20. Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste. ICRP Publication 122. *Annals of the ICRP*. 2013;42(3).

Received: September 29, 2025

Leonid A. Bolshov – Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Research, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

For correspondence: Igor I. Linge – Doctor of Technical Sciences, Adviser, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya str., Moscow, 115191, Russia; E-mail: linge@ibrae.ac.ru)

ORCID: 0009-0004-3206-8752

Sergey V. Panchenko – Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-2750-0940

For citation: Bolshov L.A., Linge I.I., Panchenko S.V. 80 years of nuclear industry and the role of radiation hygiene. *Radiatsionnaya Gygiена = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 162–170. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-162-170

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). 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 ее 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, в дальнейшем 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 **статьей, отражающих результаты randomизированных клинических исследований** – «CONSORT 2010 checklist of information to include when reporting a randomizes trial».

При подготовке **статьей, 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 **статьей, отражающих результаты качественных исследований** – «SRQR (Standards for reporting qualitative research)».

При подготовке **статьей, отражающих результаты диагностических 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, фамилии и инициалы авторов, название учреждений, реюме, 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(ов).

Наименование учреждений: полное официальное название организации, включая индекс, город и страну). Авторам необходимо указывать все места работы, имеющие отношение к проведению исследования.

Если в подготовке статьи принимали участие авторы из разных учреждений, необходимо указать принадлежность каждого автора к конкретному учреждению с помощью надстрочного индекса.

Необходимо официальное англоязычное название учреждения для блока информации на английском языке.

Рядом с фамилией автора(ов) и названием учреждения цифрами в верхнем регистре обозначается, в каком учреждении работает каждый из авторов. Если все авторы работают в одном учреждении, указывать место работы каждого автора отдельно не нужно;

Вся информация предоставляется на русском и английском языках. Указывается официально принятый английский вариант наименования организаций!

– **Резюме.** После титульного листа размещается резюме статьи на русском и английском языках (объемом 200–250 слов). Резюме выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В резюме следует излагать только релевантную информацию.

В нем должны быть четко обозначены следующие составные части:

– **Введение:** ставится научная проблема и цель статьи. Эта структурная часть резюме словом «Введение» не предваряется. Цель статьи следует предварить словами «Цель исследования: ...».

– **Материалы и методы (Materials and Methods):** даются сведения об объекте и последовательности выполнения исследования;

– **Результаты исследования и обсуждение (Results and Discussion):** приводятся конкретные авторские результаты исследования.

– **Заключение (Conclusion):** указываются практическая значимость и перспективы исследования.

Все пишется сплошным текстом, без выделения абзацев.

Для статей типа обзор, лекция, дискуссия резюме должно включать краткое изложение основной концепции статьи, то есть, по сути, краткое изложение самой статьи.

Резюме не должно содержать аббревиатур и сокращений, кроме общепринятых в мировой научной литературе. Резюме является независимым от статьи источником информации для размещения в различных научных базах данных. Обращаем 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», «Литература».

Введение (Introduction) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности. Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье. При его написании автор прежде всего должен заявить общую тему исследования, обозначить проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме того, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. 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 существование 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 доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты желательно сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективности. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и так далее 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. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В таблице 3 представлены ...» или «Полученные результаты ...

(табл. 3)». Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и внизу под номером таблицы ее название (к примеру: «Таблица 2. Параметры модели»). Выравнивается по правому краю страницы. Точка после заголовка таблицы не ставится. Название таблицы и ее структурные элементы должны быть переведены на английский язык. Перевод заключают в квадратные скобки. Перевод (к примеру: «[Table 2. Parameters of the model]») располагают с новой строки после заголовка таблицы на русском языке с выравниванием по центру.

Рисунки должны быть четкие, контрастные. Все рисунки должны иметь 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.

Все названия, подписи и структурные элементы таблиц, схем и так далее 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 сло-

вами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В списке литературы не следует указывать постановления, законы, санитарные нормы и правила, другие нормативно методические документы. Указания на них следует размещать в сносках или внутритекстовых ссылках. Сноски и внутритекстовые ссылки следует представить и на английском языке, написав после английского описания язык текста (In Russ.).

Примеры внутритекстовых ссылок:

....согласно Норм радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПин 2.6.1.2523 – 09) [перевод на английский язык (In Russ.)]. Илисогласно ГОСТ Р 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

Подстрочные ссылки (сноски):

¹ СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

² 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, Rosпотребnadzor, 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., Flanagin 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.

Bailiff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 859–863.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007. М., 2007. С. 50-51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk.ru> (Дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия. URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (Дата обращения: 16.06.2019).

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Синицын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии // Russian Electronic Journal of Radiology. 2018. Т.8, №3. С. 60-73. DOI: 10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК A61H23.00. 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 учёный, педагог, воспитатель. // Военный врач. 1996. № 8 (1332) С. 5.

Диссертация и автореферат диссертации:

Фенухин В.И. Этнополитические конфликты в современной России: на примере Северо-Кавказского региона: дис. ... канд. полит. наук: защищена 22.01.02: утв. 15.07.02. М., 2002. 215 с.

Кадука М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2001. 23 с.

Второй список литературы (References) полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется также в соответствии с Ванкуверским форматом цитирования При этом, в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов должны быть транслитерированы. Название работы переводится на английский язык. Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

Ниже приведены **примеры библиографических ссылок для второго списка литературы**.

Статья 1-6 авторов:

Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 891-909.

Stamat IP, Kormanovskaya TA, Gorsky GA, Eremin AV. To the justification of requirements to the control of radiation protection indicators for buildings and facilities during their commissioning. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 10-15 (In Russian).

Статья 7 и более авторов (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»):

Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, Avila R, Spiridonov SI, Klein D, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ¹³⁷Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105-113.

Vodovatov AV, Chipiga LA, Piven PA, Trufanov GE, Berkovich GV, Mashchenko IA, et al. Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 126-135. (In Russian).

Morozov SP, Kuzmina ES, Vetsheva NN, Gombolevsky VA, Lantukh ZA, Polishuk NS, et al. Moscow Screening: Lung Cancer Screening With Low-Dose Computed Tomography. *Problemy sotsialnoy gigiyeny, 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 Coethem 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-is-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, должностъ 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 (титульный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благо-

дарности, 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 подписанныго 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 договорённости, касающиеся неэклектизивного 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 большему 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)