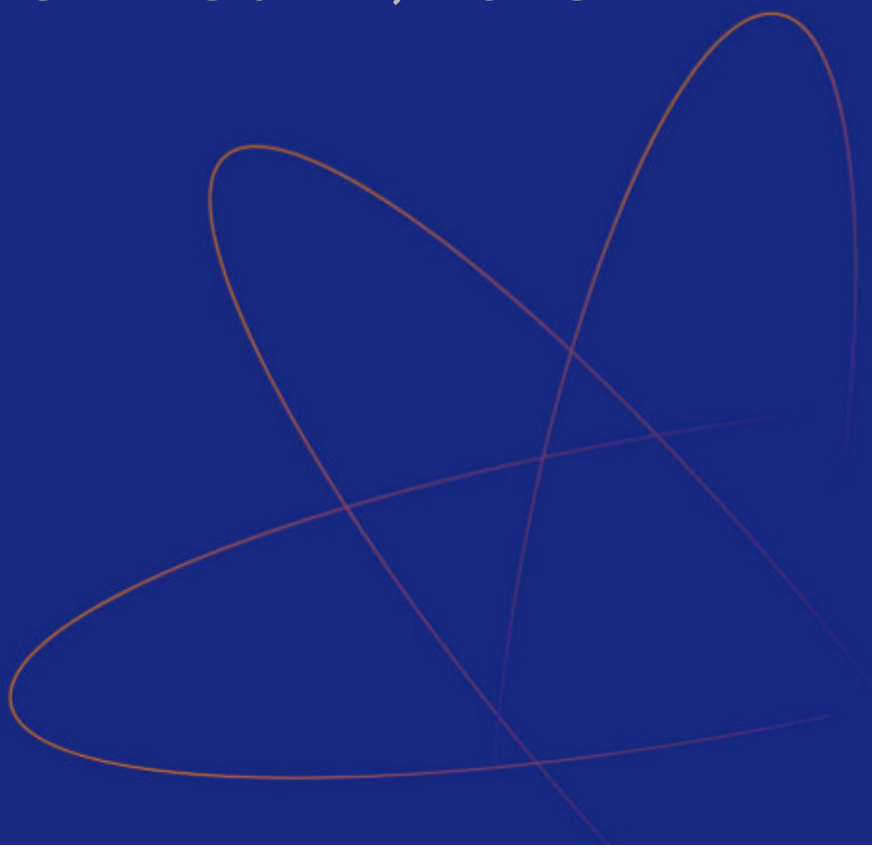


ISSN 1998-426X (print)
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 18 № 1, 2025



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

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

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

Задачи журнала:

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

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

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

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

Журнал распространяется по подписке
Индекс для подписки в агентстве
«Книга-Сервис» - **Ф57988**
Стоимость годовой подписки – 3920 руб.
Подписано в печать 31.03.2025
Формат 60x84/8. Печать офсетная. 18 печл.

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

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

Научно-практический журнал

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

Издается ежеквартально.

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

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

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



Председатель редакционного совета

Онищенко Геннадий Григорьевич — Государственная Дума, д.м.н., профессор, академик РАН (Москва, Российская Федерация)

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Редакционный совет

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

Башкетова Наталья Семеновна — Управление Роспотребнадзора по г. Санкт-Петербургу (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

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

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

Иванов Виктор Константинович — Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ «Федеральный медицинский исследовательский центр имени П.А. Герцена» Минздрава России», д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН (Обнинск, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

Редакционная коллегия

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

Аклеев Александр Васильевич — ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» Федерального медико-биологического агентства, д.м.н., профессор (Челябинск, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

FOUNDER & PUBLISHER

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

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

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

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

Objectives:

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

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

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

Editorial office address:

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

The journal is distributed by subscription
Index for subscription in the agency
“Book-Service” - F57988.

The cost of annual subscription – 3920 rubles.

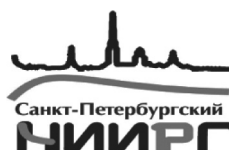
RADIATION HYGIENE

Quarterly peer-reviewed scientific and practical journal

The Journal was founded in 2007 and is the first and only specialized periodical on issues of radiation hygiene and radiation safety of the population.

The Journal is included in the list of Russian peer-reviewed journals, in which the main scientific results for the degree of candidate and doctor of sciences should be published.

The journal is indexed in the multidisciplinary bibliographic and abstract database Scopus, Russian Index of Citation (RINC). It is represented on the platforms of aggregators elibrary.ru, RUSMED, Google Scholar, Dimensions, DOAJ (Directory of Open Access Journals), VINITI RAN, RGV, etc. (<https://www.radhyg.ru/jour>)



Chairman of Editorial Council

Gennadiy G. Onishchenko — the State Duma, Russian Academy of Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, M.D. Professor (Moscow, Russian Federation)

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Members of Editorial Council

Sergey S. Aleksanin — Federal State Organization «A. M. Nikiforov All-Russia Center of Emergency and Radiation Medicine» of EMERCOM of Russia, M.D., Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Том 18 № 1, 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 пищевых продуктах природного происхождения по результатам современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области 7

Вишневецкая Т.В., Цыпленкова М.Ю., Исубакова Д.С.,
Цымбал О.С., Мильто И.В., Тахауов Р.М.

Оценка спектра и частоты хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников объекта использования атомной энергии на протяжении 15 лет трудовой деятельности 18

Кузьмичева О.В., Ускалова Д.В., Дегтярева Д.Т.,
Уланова Т.В., Шкавров С.В., Сарапульцева Е.И.

Анализ радиопротекторных свойств фумарата 3-гидроксипиридина на модели беспозвоночного животного после облучения протонами в опытах *in vivo* 27

Кормановская Т.А., Гаевый С.В., Бондарь Л.В.,
Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А., Балабина Т.А.

Уровни содержания радона в жилых и общественных зданиях западных районов Оренбургской области с высокими показателями заболеваемости населения злокачественными новообразованиями органов дыхания 38

Поволоцкая С.В., Сокольников С.С.

Состояние слизистой оболочки желудка у персонала, контактирующего с соединениями трития 49

Чипига Л.А., Лихачева А.В., Звонова И.А., Водоватов А.В.,
Тоскин О.Ю., Сапельников А.А., Величкина К.С.,
Терентьева А.С., Станжевский А.А.

Защитные мероприятия для отдельных категорий лиц при контакте с пациентом после радионуклидной терапии 59

Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Лаврешов Д.Д.

Зависимость коэффициентов перехода к эффективной дозе от веса пациентов, подвергающихся рутинным рентгенологическим исследованиям 70

ОБЗОРЫ

Буртовая Е.Ю., Кантина Т.Э., Литвинчук Е.А.

Характеристика факторов, влияющих на состояние психического здоровья облученных лиц в отдаленном периоде после радиационного воздействия 76

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

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

Анализ уровней медицинского облучения населения Российской Федерации в 2023 г. с использованием актуализированной формы №3-ДОЗ 85

CONTENTS

Vol. 18 № 1, 2025

RESEARCH ARTICLES

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 ^{137}Cs in foodstuffs of wild origin according to the results of the radiation-hygienic survey of the Bryansk region settlements 15

Vishnevskaya T.V., Tsyplenkova M.Yu., Isubakova D.S.,
Tsybal O.S., Miltov I.V., Takhauov R.M.

Assessment of the spectrum and frequency of chromosomal aberrations in blood lymphocytes of employees of an atomic energy facility during 15 years of work 26

Kuzmicheva O.V., Uskalova D.V., Degtyareva D.T.,
Ulanova T.V., Shkavrov S.V., Sarapultseva E.I.

Analysis of the radioprotective properties of 3-hydroxypyridine fumarate on an invertebrate animal model after proton irradiation *in vivo* 35

Kormanovskaya T.A., Gaevoy S.V., Bondar L.V.,
Kononenko D.V., Saprykin K.A., Balabina T.A.

Indoor radon concentrations in dwellings and public buildings in the western districts of the Orenburg region with increased respiratory system cancer morbidity rates 46

Povolotskaya S.V., Sokolnikov S.S.

State of the gastric mucosa in workers contacting with tritium compounds 56

Chipiga L.A., Likhacheva A.V., Zvonova I.A., Vodovатов A.V.,
Toskin O.Yu., Sapelnikov A.A., Velichkina K.S., Terenteva A.S.,
Stanzhevsky A.A.

Precautions for certain categories of individuals in contact with a patient after radionuclide therapy 68

Golikov V.Yu., Vodovатов A.V., Lavreshov D.D.

Effective dose conversion coefficients as a function of patient weight for routine X-ray examination 75

REVIEWS

Burtovaya E.Yu., Kantina T.E., Litvinchuk E.A.

Characteristics of factors affecting the mental health of exposed persons in the long-term period after radiation exposure 82

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

Vodovатов A.V., Kosarluкова E.A., Biblin A.M.,
Akhmatdinov R.R., Bratilova A.A.

Analysis of medical exposure levels of the Russian Federation population in 2023 using the updated form No. 3-DOZ 85

СОДЕРЖАНИЕ

Том 18 № 1, 2025

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

*Варфоломеева К.В., Седнев К.А., Библин А.М., Иванов С.А.,
Зеленцова С.А., Репин В.С., Георгиева А.Г.*

**Радиационно-гигиеническая характеристика
и санитарное состояние территории проведения
мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2»
в Республике Коми 100**

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

*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 112**

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Шишкина Е.А., Шарagin П.А., Толстых Е.И.

**Компьютерная программа расчета
внутриутробных доз от техногенных
радионуклидов 121**

ДИСКУССИИ

Микляев П.С., Петрова Т.Б., Цапалов А.А.

**О неполноте обзора подходов
к оценке потенциальной радоноопасности
земельных участков 127**

*Водоватов А.В., Репин Л.В., Библин А.М., Кононенко Д.В.,
Горский Г.А.*

**К вопросу монетарной оценки потенциального
ущерба, связанного с воздействием
ионизирующего излучения на население
Российской Федерации 132**

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 140**

CONTENTS

Vol. 18 № 1, 2025

RADIATION SAFETY DURING DECOMMISSIONING OF NUCLEAR LEGACY SITES

*Varfolomeeva K.V., Sednev K.A., Biblin A.M., Ivanov S.A.,
Zelentsova S.A., Repin V.S., Georgieva A.G.*

**Radiation-hygienic characteristics
and sanitary condition of the territories
of the Globus-3 and the Quartz-2 peaceful nuclear
explosions in the Komi Republic 109**

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

*Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Vasilyev A.S.,
Saprykin K.A.*

**New guidelines on radiation survey
of land plots for their sanitary assessment
in terms of radiation safety indicators 119**

BRIEF REPORTS

Shishkina E.A., Sharagin P.A., Tolstykh E.I.

**Computer program for calculation
of in-utero doses from anthropogenic
radionuclides 125**

DISCUSSION

Miklyaev P.S., Petrova T.B., Tsapalov A.A.

**About the incompleteness of the review
of approaches to assessing the potential
radon hazard of land sites 130**

*Vodovатов A.V., Repin L.V., Biblin A.M., Kononenko D.V.,
Gorsky G.A.*

**Issues of monetary evaluation of potential
radiation detriment of the population
of the Russian Federation 132**

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 140**

Содержание ^{137}Cs в пищевых продуктах природного происхождения по результатам современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области¹

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

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

Введение: В объектах природных экосистем, включенных в пищевые цепочки, конечным звеном которых является человек, в отдаленные сроки после чернобыльской аварии на радиоактивно загрязненных территориях отмечаются высокие уровни содержания ^{137}Cs . Целью данного исследования являлась характеристика современных уровней содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах природного происхождения из приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области. *Материалы и методы:* Проведен анализ данных о содержании ^{137}Cs в 1837 образцах природных пищевых продуктов, взятых для исследования у жителей населенных пунктов Брянской области. *Определение ^{137}Cs в пробах пищевых продуктов* проводили гамма-спектрометрическим методом. *Результаты исследования и обсуждение:* Превышение допустимых уровней по содержанию ^{137}Cs выявлено для всех основных категорий природных пищевых продуктов: грибы (40 % исследованных образцов не удовлетворяют требованиям радиационной безопасности), лесные ягоды (55 %), мясо диких животных (50 %), рыба местных водоемов (18 %). Общая доля проб пищевых продуктов природного происхождения, не удовлетворяющих гигиеническим требованиям, составила 43 %. *Поступление ^{137}Cs в организм жителей с природными пищевыми продуктами* может быть сопоставимо либо значительно превышать поступление ^{137}Cs с сельскохозяйственными пищевыми продуктами местного производства при гораздо меньших объемах потребления. *Заключение:* В формировании дозы внутреннего облучения жителей радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС территорий Брянской области в настоящее время доминируют пищевые продукты природного происхождения. Основным дозообразующим пищевым продуктом являются лесные грибы.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, население, внутренне облучение, цезий-137, природные пищевые продукты.

Введение

Внутренне облучение населения территорий, загрязнение которых связано с попаданием в окружающую среду радиоактивных веществ, формируется преимущественно за счет поступления радионуклидов с местными пищевыми продуктами. В лесных экосистемах территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), наблюдается процесс рециркуляции радионуклидов в подстильно-почвенном комплексе. По наблюдениям разных исследований последних лет, запас ^{137}Cs в лесных автоморфных почвах, как правило, сосредоточен в пятисантиметровом слое [4, 5]. Существенное влияние на интенсивность миграции радионуклидов в подстильно-почвенном комплексе оказывает влажность почвы, а на накопление ^{137}Cs в лесной растительности и грибах – их видовые особенности [6–9].

В приведенных литературных данных о современных уровнях радиоактивного загрязнения природных пищевых продуктов, отобранных из личных подсобных хозяйств (ЛПХ) населенных пунктов (НП) Гомельской и Могилевской области Республики Беларусь, придается значение тому обстоятельству, что снижение содержания радиоактивных веществ в грибах и лесных ягодах, как и в прочей растительности лесных экосистем, в настоящее время происходит медленно, а в исследованных лесных пищевых продуктах доля проб, не удовлетворяющих требованиям радиационной безопасности, весьма велика [10, 11]. К примеру, в публикации [11] приведена информация о том, что в последние годы превышения допустимых уровней установлены в 42 % исследованных проб грибов.

В большинстве современных исследований отмечается высокое содержание ^{137}Cs в объектах природных экосистем, включенных в пищевые цепочки, конечным звеном

¹Продолжение. Начало статьи опубликовано в журнале «Радиационная гигиена» [1–3]. [The continuation. The beginning was published in the Radiation Hygiene [1–3]].

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

которых является человек [12–16], т.е. в отдаленные сроки после аварии радионуклиды продолжают оставаться биологически доступными для населения через потребление пищевых продуктов природного происхождения.

Цель исследования – дать характеристику современным уровням содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах природного происхождения из приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области.

Материалы и методы

Исследования содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах природного происхождения выполнены в рамках проведения радиационно-гигиенических обследований НП юго-западных районов Брянской области в период 2019–2022 гг. [1]. Методы проведения комплексных радиационно-гигиенических обследований НП территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС, изложены в документах Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор)^{2,3}. Во время проведения радиационно-гигиенических обследований НП был организован отбор образцов наиболее представительных для данной местности пищевых продуктов природного происхождения, а также проведен опрос жителей об объемах потребления таких пищевых продуктов [1, 2].

Для получения более полной информации о содержании ^{137}Cs в пищевых продуктах природного происхождения, были собраны и обобщены результаты радиационного мониторинга, проводимого в НП учреждениями санитарно-эпидемиологической службы в тот же период времени. Объем, порядок и методы радиационного мониторинга изложены в соответствующем методическом документе Роспотребнадзора⁴.

Определение ^{137}Cs в пробах пищевых продуктов природного происхождения проводили гамма-спектрометрическим мето-

дом^{5,6}. Измерения счетных образцов проводили на спектрометрическом оборудовании (гамма-спектрометрические комплексы «Прогресс» (НПП «Доза», Россия) и МКС-01А «Мультирад» («НПЦ "Амплитуда", Россия)). Анализ проведен по результатам определения ^{137}Cs в 1837 пробах пищевых продуктов природного происхождения, в т.ч.: в 679 пробах, исследованных в рамках комплексных радиационно-гигиенических обследований НП, и в 1158 пробах, исследованных в рамках проведения радиационно-гигиенического мониторинга.

Информация о плотности загрязнения ^{137}Cs почвы территории⁷ (σ^{137}) была предоставлена Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

Обработка, статистический анализ данных и расчеты проводили с использованием программ MS Excel, Statistica (ver. 12), пакетов статистической обработки среды программирования R (CRAN), платформы статистического анализа JASP.

Результаты и обсуждение

Анализ данных о содержании ^{137}Cs в 679 пробах пищевых продуктов природного происхождения (рис. 1), взятых для исследования у жителей НП приграничных территорий в рамках проведения комплексных радиационно-гигиенических обследований НП [1], выявил 38 % случаев превышения допустимых уровней содержания в них этого радионуклида. В доленом отношении, наибольшая часть несоответствий образцов природных продуктов требованиям радиационной безопасности пришлась на пробы мяса диких животных (50 %) и пробы лесных ягод (48 %); доля образцов лесных грибов, неудовлетворяющих гигиеническим требованиям, составила 37 % и столько же – доля проб рыбы местных водоемов.

Максимальное значение удельной активности ^{137}Cs в пробах свежих грибов составило 13 КБк/кг (из п. Вышков Злынковского района, где $\sigma^{137} \approx 590$ КБк/м²), что превышает допустимый уровень⁸ более чем в 20 раз; в пробах консер-

² МР 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.)]

³ МР 2.6.1.0007-10: Оценка доз облучения детей, проживающих на территориях, радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 27 с. [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.)]

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

⁵ МРК № 40151.16397/RA.RU. 311243-2015 «Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» [MRK No 40151.16397/RA.RU. 311243-2015. Methodology for measuring radionuclide activity using a scintillation gamma spectrometer with the Progress software. (In Russ.)]

⁶ МВИ № 40090.3Н700 «Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» [MVI No. 40090.3Н700. Methodology for measuring the activity of radionuclides using a scintillation gamma spectrometer with the Progress software. (In Russ.)]

⁷ Данные Росгидромет о средней плотности загрязнения ^{137}Cs почвы территории населенного пункта (137) приведены по состоянию на год выполнения исследования, если не оговорено иное. [^{137}Cs soil surface activity data are given as of the year the study was conducted, unless otherwise stated].

⁸ СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы / под ред. В.А. Тутельян. М.: ИнтерСЭН, Континент Торг, 2002. 164 с. [Tutelyan VA, Ed. Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01 (SanPiN 2.3.2.1078-01). Hygienic requirements on the safety and food value of the food products. Sanitary rules and norms. Moscow: InterSEN; 2002. 164 p. (In Russ.)]; Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Доп. и изм. 18 (СанПиН 2.3.2.2650-10), доп. 19 к СанПиН 2.3.2.1078-01: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 10 с. [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10 (SanPiN 2.3.2.2650-10). Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products. Add. and rev. 18, add. 19 to SanPiN 2.3.2.1078-01: Sanitary rules and norms. Moscow: Rospotrebnadzor; 2010. 10 p. (In Russ.)]

вированных грибов максимальное значение удельной активности ^{137}Cs было определено как 1,6 кБк/кг (п. Красная Гора, $\sigma^{137} \approx 150$ кБк/м²). Самое высокое содержание ^{137}Cs в пробах сушеных грибов (удельная активность ^{137}Cs в пробе – 36,5 кБк/кг) выявлено в 2019 году в с. Рожны Клинцовского района (почти пятнадцатикратное превышение допустимого уровня), где средняя плотность загрязнения этим радионуклидом почвы территории НП и его ареала на год

исследования составляла 185 кБк/м². Максимальное значение удельной активности ^{137}Cs в пробах лесных ягод (2,7 кБк/кг) превысило допустимый уровень почти в 20 раз (проба взята исследование в с. Старые Бобовичи Новозыбковского городского округа, $\sigma^{137} \approx 480$ кБк/м²), в пробах мяса диких животных – в 2 раза (577 Бк/кг, г. Клинцы), в пробах рыбы местных водоемов – почти в 2,5 раза (313 Бк/кг, с. Великая Топаль Клинцовского района).

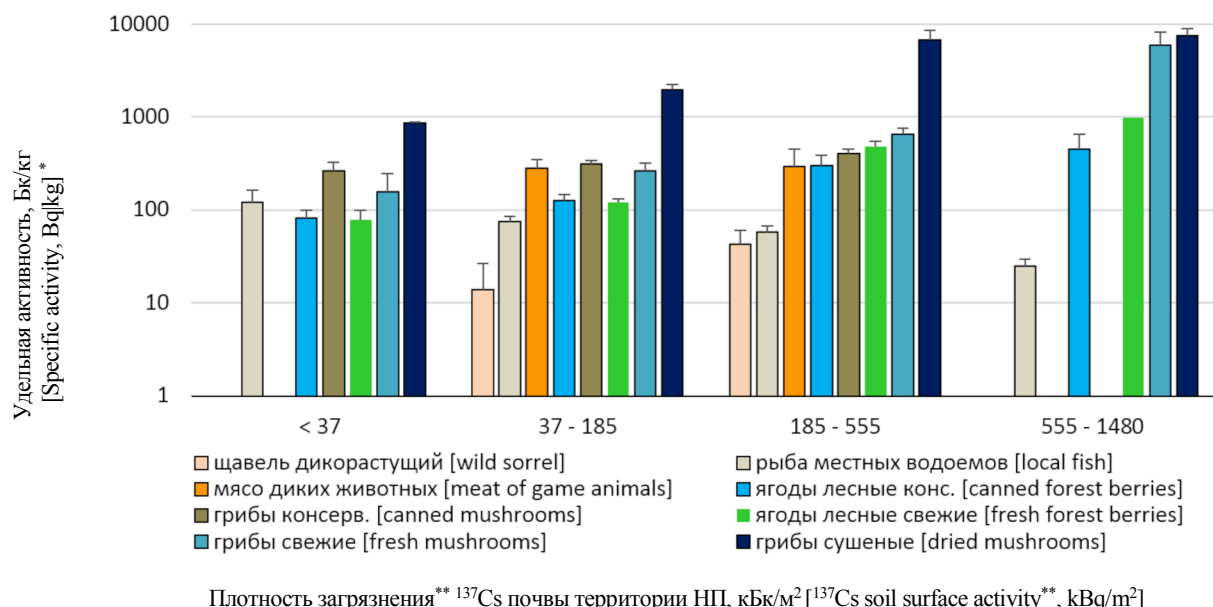


Рис. 1. Средняя удельная активность ^{137}Cs в пробах пищевых продуктов природного происхождения (по результатам комплексных радиационно-гигиенических обследований НП в 2019-2022 гг.)

* На графике приведены значения стандартной ошибки средних (выносная линия).

** Уровни плотности загрязнения ^{137}Cs почвы.

[Fig. 1. Average specific activity of ^{137}Cs in natural (wild origin) foodstuff samples (according to the data on settlements surveyed in 2019-2022)

* The standard errors of mean values are given with black lines.

** ^{137}Cs soil surface activity levels.]

Высокие уровни содержания ^{137}Cs также обнаружены в отдельных видах растений, произрастающих на лугах близ лесных массивов и используемых населением в пищу. Оцененные значения удельной активности ^{137}Cs в двух пробах щавеля лугового (75 и 89 Бк/кг), взятых для исследования у жителей Гордеевского района, близки к установленному санитарными правилами значению допустимого уровня⁹ (80 Бк/кг). Обе пробы взяты из НП Кузнецы и Уношево ($\sigma^{137} \approx 185$ кБк/м²), принадлежащих к одному сельскому поселению (Уношевскому), в состав земель которого входят участки с торфяно-болотными почвами.

Результаты исследований содержания ^{137}Cs в природных пищевых продуктах, входящих в состав рациона питания жителей черномыльских территорий, указывают на значимость «природного» компонента в формировании дозы внутреннего облучения и в настоящее время, что также подтверждают результаты многих современных исследо-

ваний [6, 14, 17, 18]. На территориях с различными уровнями плотности радиоактивного загрязнения почвы выявлены образцы всех видов природных пищевых продуктов с превышением допустимых уровней содержания в них ^{137}Cs . Графически представленное на рисунке 2 сопоставление средних уровней содержания ^{137}Cs в двух наиболее потребляемых (каждый в своей категории) жителями НП приграничных с Республикой Беларусь территорий продуктов – в молоке из ЛПХ [3] и в собранных в близлежащих к НП лесных массивах грибах (свежих, без предварительной кулинарной обработки) – показывает, что на территориях с различными уровнями загрязнения почвы ^{137}Cs содержание этого радионуклида в грибах, в среднем выше на порядок, чем его концентрация в молоке, что означает, что поступления ^{137}Cs в организм жителей с этими пищевыми продуктами могут быть сопоставимы даже при гораздо меньших объемах потребления грибов, чем молока.

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

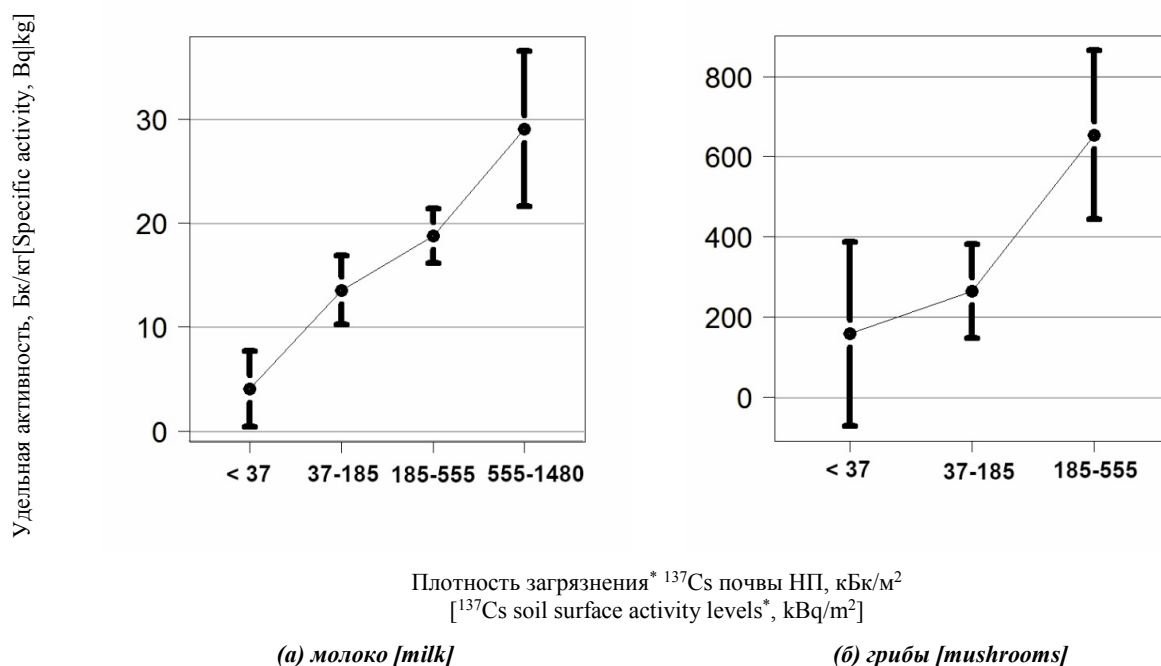


Рис. 2. Доверительные интервалы ($P=0,95$) средних значений удельной активности ^{137}Cs в пробах молока коровьего (а) и грибов свежих (б)
[Fig. 2. Confidence intervals ($P=0.95$) for the mean values of specific activity of ^{137}Cs in cow milk (a) and fresh mushroom samples (б)]

В таблице 1 представлены обобщенные результаты исследований содержания ^{137}Cs в 1837 образцах пищевых продуктов природного происхождения, полученные в рамках радиационно-гигиенических обследований НП и в рамках проведения радиационного мониторинга. Анализ обобщенных данных выявил 40 % случаев превышения допустимых уровней содержания ^{137}Cs в пробах грибов, 55 % – в пробах лесных ягод, 50 % – в исследованных образцах мяса диких животных, 18 % – в пробах рыбы местных водоемов. Общая доля проб природных продуктов, не удовлетворяющих гигиеническим требованиям, составила 43 %, т.е., в грубом приближении, почти половину всех исследованных образцов этого вида пищевых продуктов. При этом образцы природных пищевых продуктов, не удовлетворяющие требованиям радиационной безопасности, выявлены во всех административных районах исследуемой территории с различными уровнями радиоактивного загрязнения почвы по ^{137}Cs [1].

Проследить тенденцию к увеличению содержания ^{137}Cs в лесных грибах и ягодах с возрастанием плотности загрязнения цезием почвы ареала НП можно на рисунке 3, где представлены графики распределений величин удельной активности ^{137}Cs в исследованных пробах (на графиках приведены диаграммы размаха с указанием медианы, нижнего и верхнего квартилей). В отношении лесных грибов в распределении исследуемых величин (рис. 3, фрагмент а) прослеживается присутствие аномальных значений («выбросы» на графике обозначены символом в виде круга), что можно объяснить, помимо прочих причин (таких как, к примеру, сбор грибов за пределами ареала НП проживания), тем, что

межвидовую способность грибов к накоплению ^{137}Cs отличает большая вариабельность [6, 7, 19–23]; при этом изменение влажности почвы также может существенно повлиять на переход радионуклида из подстилочного слоя в грибы. Сравнительно меньшая доля аномальных значений в распределении величин удельной активности ^{137}Cs , определенной в пробах лесных ягод (рис. 3, фрагмент б), демонстрирует большую устойчивость в характеристиках распределения, что вполне объяснимо, поскольку преобладающую долю (97 %) исследованных образцов лесных ягод составляла черника и этот вид лесных ягод местное население, как правило, собирает вблизи НП проживания.

Рассчитанные по результатам проведенных исследований коэффициенты перехода (КП) ^{137}Cs из почвы в лесные грибы и ягоды представлены в таблице 2. Расчет выполнен для проб, отобранных с территорий, где плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в момент отбора проб была выше 37 кБк/м². Для расчета КП использовали среднюю плотность загрязнения почвы ареала НП, в котором были отобраны пробы. Однако следует принимать во внимание, что значения КП ^{137}Cs (далее – КП (^{137}Cs)) из почвы в лесные грибы и ягоды получены без разделения исследованных образцов продуктов по группам типов почв. В «грибную корзину» вошли лисички (наибольшая доля из всех исследованных видов), белые грибы, польские грибы, подберезовики, грузди, опята, маслята, волнушки и пр. В «ягодную корзину» – черника (преобладающая доля от всего объема исследованных образцов лесных ягод), малина, земляника, брусника, клюква и пр.

Таблица 1

Удельная активность ^{137}Cs в пищевых продуктах природного происхождения, Бк/кг
(по обобщенным данным радиационно-гигиенических обследований населенных пунктов и данным радиационно-гигиенического мониторинга, 2019-2022 гг.)

[Table 1

Specific activity of ^{137}Cs in natural (wild origin) foodstuffs, Bq/kg
(according to the united data, 2019-2022)]

Пищевые продукты [Foodstuffs]	Статистические параметры [Statistical parameters]*					
	<i>N</i>	Среднее $\pm$ ст. ош. [Mean $\pm$ St. err.]	Медиана [Median]	Геом. средн. [GM]	КВ [CV], %	Максимум [Maximum]
$\sigma^{137} < 37$ (15 НП [settlements])						
грибы лесные [mushrooms] **	18	210 $\pm$ 50	150	150	0,91	600
ягоды лесные [forest berries] **	13	80 $\pm$ 10	70	70	0,56	170
рыба местных водоемов [local fish] ***	3	120 $\pm$ 40	150	100	0,62	180
$37 \leq \sigma^{137} < 185$ (119 НП [settlements])						
грибы лесные [mushrooms] **	482	330 $\pm$ 200	220	200	1,3	7200
ягоды лесные [forest berries] **	237	150 $\pm$ 11	100	110	1,1	1700
рыба местных водоемов [local fish] **	54	80 $\pm$ 10	60	60	0,85	310
мясо дичи [meat of game] **	15	240 $\pm$ 50	210	180	0,75	580
$185 \leq \sigma^{137} < 555$ (93 НП [settlements])						
грибы лесные [mushrooms] **	619	850 $\pm$ 60	560	470	1,8	2·10 ⁴
ягоды лесные [forest berries] **	239	470 $\pm$ 30	280	270	1,1	2700
рыба местных водоемов [local fish] **	71	70 $\pm$ 10	40	40	1,2	460
мясо дичи [meat of game] **	9	1500 $\pm$ 700	450	540	1,4	5600
$555 \leq \sigma^{137} < 1480$ (9 НП [settlements])						
грибы лесные [mushrooms] **	43	2000 $\pm$ 380	1100	1200	1,3	13·10 ³
ягоды лесные [forest berries] **	18	470 $\pm$ 60	450	360	0,54	990
рыба местных водоемов [local fish]	4	24 $\pm$ 3	20	20	0,29	40
мясо дичи [meat of game] **	2	920 $\pm$ 510	920	770	0,78	1400
$\sigma^{137} > 1480$ (1 НП [settlement])						
грибы лесные [mushrooms] **	3	5600 $\pm$ 1300	6100	5300	0,39	7500

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

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

** Имеются превышения допустимых уровней [There are values exceeding of the permissible levels]¹⁰.

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

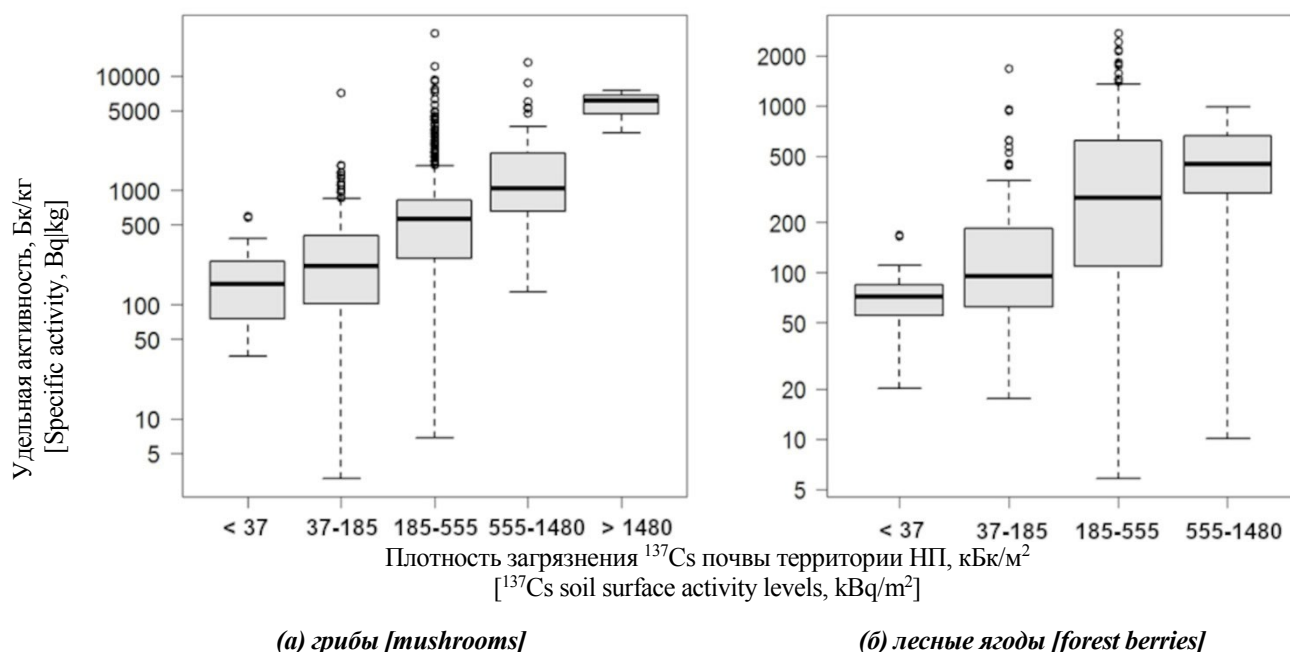


Рис. 3. Распределение значений удельной активности ^{137}Cs в пробах грибов и лесных ягод (по уровням плотности загрязнения почвы ареала НП)

[Fig. 3. Distribution of specific activity of ^{137}Cs values for wild origin foodstuff samples (by levels of soil contamination density with ^{137}Cs)

Коэффициенты перехода ^{137}Cs (КП(^{137}Cs)) из почвы в лесные грибы и ягоды, $10^{-3}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$

Таблица 2

Transfer factor of ^{137}Cs (TF(^{137}Cs)) to wild origin foodstuff samples, $10^{-3}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$

[Table 2]

Пищевые продукты [Foodstuffs]	Статистические параметры [Statistical parameters]*						Макс. [Max.]
	N	Среднее [Mean]	Ст. откл. средн. [SD]	Геом. средн. [GM]	Ст. откл. геом. средн. [GSD]	K95 [Q95]	
лесные грибы [mushrooms]	563	2,4	2,7	1,6	2,5	6,8	23
лесные ягоды [forest berries]	353	1,4	1,3	0,92	2,7	4	12

* Используются следующие обозначения статистических параметров: Ст. откл. средн. – стандартное отклонение от среднего арифметического значения; Ст. откл. геом. средн. – стандартное отклонение от среднего геометрического значения; K95 – 95-й процентиль (95% квантиль) [The names and symbols of quantities are 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)].

Оцененные значения коэффициентов перехода ^{137}Cs в лесные ягоды (чернику) удовлетворительно сходятся с прогнозными оценками содержания ^{137}Cs в этих видах лесных ягод, выполненными 15 лет назад [23].

Статистический анализ данных, полученных в проведенном нами исследовании КП(^{137}Cs) из почвы в свежие лесные грибы и ягоды и КП(^{137}Cs) из почвы в продукты кулинарной обработки даров леса (маринады, соленья, варенье), показал эффективность применения этапов вымачи-

вания и отваривания (с подсаливанием и подкислением) при приготовлении кулинарных блюд из лесных грибов и этапов промывания и добавления «чистого» ингредиента (сахара) в готовые продукты из лесных ягод. Результаты проведенного анализа представлены на рисунке 4 на примере территорий с плотностью радиоактивного загрязнения почвы свыше $555\text{ kBq}/\text{м}^2$ по ^{137}Cs . Полученные результаты хорошо согласуются с данными других исследований [7, 23, 24].

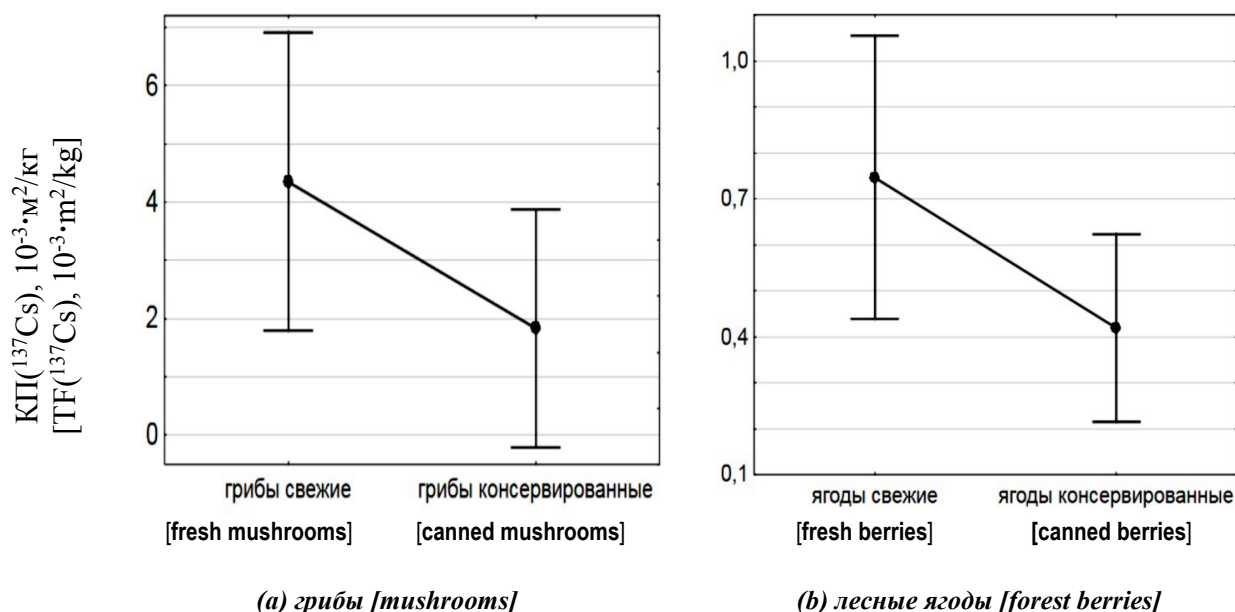


Рис. 4. Доверительные интервалы (P=0,95) средних значений КП(¹³⁷Cs) для лесных грибов и ягод
[Fig. 4. Confidence intervals (P=0.95) for the mean values of TF(¹³⁷Cs) from soil to mushrooms and forest berries]

Сравнительный анализ распределений величин удельной активности радионуклида в свежих грибах и в готовом продукте показал статистически значимое отличие в меньшую сторону содержания ¹³⁷Cs в продукте после кулинарной обработки ($p < 0,05$; U-критерий Манна-Уитни с предварительным тестом принадлежности выборок к нормальному распределению с использованием критерия Шапиро-Уилка).

Заключение

По результатам нашего исследования установлено, что радиологическим критериям безопасности содержания ¹³⁷Cs в пищевых продуктах не отвечает существенная часть исследованных образцов пищевых продуктов природного происхождения, отобранных в НП Брянской области, граничащих с Республикой Беларусь. Превышение установленных санитарными правилами допустимых уровней обнаружено для 43 % от всего объема проб природных пищевых продуктов, в т.ч. 40 % – для проб грибов, 55 % – для проб лесных ягод, 50 % – для проб мяса диких животных, 18 % – для проб рыбы местных водоемов. Пробы пищевых продуктов природного происхождения, не удовлетворяющие требованиям радиационной безопасности, выявлены во всех административных районах исследуемой территории с различными уровнями радиоактивного загрязнения почвы ¹³⁷Cs [1]. Результаты наших исследований хорошо согласуются с результатами исследований радиационно-гигиенической ситуации белорусских авторов [10, 11, 14].

Таким образом, по результатам исследований содержания ¹³⁷Cs в образцах пищевых продуктов природного происхождения, наиболее потребляемых населением обследованных НП [2], и по результатам анализа приведенных здесь литературных данных можно сделать вывод о том, что в настоящее время лесные грибы являются основным дозообразующим пищевым продуктом природного происхождения для жителей НП Брянской области, граничащих с Республикой Беларусь.

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, обработка полученных результатов, редактирование текста статьи.

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

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

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

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

Благодарности

Авторы выражают благодарность и признательность за содействие в работе В.А. Яковлеву, О.С. Баженовой и Е.А. Дроздовой (специалистам Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева в период проведения исследований), Е.И. Злотниковой (врачу по санитарно-гигиеническим лабораторным исследованиям радиологической лаборатории ФБУЗ ЦГиЭ в Брянской области), А.В. Кудряшовой (главный врач филиала ФБУЗ ЦГиЭ в городе Клинцы Брянской области), В.А. Лалайну (заместитель

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

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. Романович И.К., Базюкин А.Б., Барковский А.Н. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 1: Характеристика населенных пунктов: 3 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 22–36.
2. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 2: Структура рационов питания населения: 4 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 7–21.
3. 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.
4. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В. Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015–2016 гг. // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 27–41.
5. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Корреляция между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесах, загрязненных ^{137}Cs : отдаленный период после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 37–46.
6. Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бекашева Т.А. и др. Радиоактивное загрязнение грибов в отдаленный период после аварии на ЧАЭС. // Радиационно-гигиенические последствия и уроки аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»: Материалы международной научно-практической конференции. СПб: Федеральное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2021. С. 111–115.
7. Кадука М.В., Бекашева Т.А., Иванов С.А. и др. Особенности аккумуляции изотопов цезия съедобными видами лесных грибов // Современные проблемы радиационной медицины: от науки к практике: Материалы Международной научно-практической конференции. Гомель: ГУ «РНПЦ РМиЭЧ», 2022. С. 38–40.
8. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. Москва: Наука, 2000. 268 с.
9. Шилова К.В. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах лесного происхождения Брянской области // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 2. С. 55–61.
10. Беларусь и Чернобыль: 36 лет спустя. Информационно-аналитические материалы. Минск: Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, 2022. 50 с.
11. Семененя И.Н. Радиационная безопасность продуктов питания, производимых в Республике Беларусь // Беларуская думка. 2022. Т. 4. С. 52–59.
12. Панов А.В., Марочкина Е.В., Пономаренко В.В. О роли грибов в формировании доз внутреннего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС территориях // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 63–70.
13. Чернушевич Г.А., Азовская Н.О., Домненкова А.В., Киселев С.В. Анализ влияния радиоактивного загрязнения «даров леса» на внутреннее облучение населения // Труды Белорусского государственного технологического университета. 2021. Т. 2 (246). С. 298–305.
14. Чернушевич Г.А., Азовская Н.О., Киселев С.В. Исследование влияния радиоактивного загрязнения лесных даров на внутреннее облучение населения Беларуси // Труды Белорусского государственного технологического университета. 2018. Т. 2(210). С. 288–294.
15. Панченко С.В., Панфилова А.А. Роль лесных экосистем в формировании дозовых нагрузок на население: Препринт № IBRAE-2000-01. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2000. С. 50.
16. Щур А.В., Виноградов Д.В., Агеева Т.Н. и др. Влияние радиэкологической ситуации в приселитебных лесных массивах на дозы внутреннего облучения сельских жителей // Вестник Поволжского государственного технологического университета. 2016. Т. 1, № 29. С. 79–86.
17. Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бекашева Т.А. и др. Радиационные показатели пищевой продукции на загрязненных территориях России в отдаленный период после аварии на ЧАЭС // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: Сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. С. 328–331.
18. Братилова А.А., Брук Г.Я. Влияние потребления различных пищевых продуктов на формирование доз внутреннего облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 53–59.
19. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments: ISSN 0074–1914 472. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
20. Шабалева М.А., Булко Н.И., Козлов А.К. Прогнозирование радиоактивной загрязненности лесной пищевой продукции ^{137}Cs и средней дозы внутреннего облучения организма за счет ее употребления // Проблемы здоровья и экологии. 2014. Т. 2. С. 120–125.
21. Радиэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под общ. ред. Санжарова Н.И., Фесенко С.В. Москва: РАН, 2018. 278 с.
22. Шилова К.В., Кадука М.В., Шутов В.Н. Динамика радиоактивного загрязнения пищевых продуктов природного происхождения после аварии на ЧАЭС // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 4. С. 23–26.
23. Шутов В.Н., Кадука М.В., Кравцова О.С. и др. Защита от радиации. Научно-популярное пособие. СПб, 2011. 88 с.
24. Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Репин В.С. Предпочтительные способы кулинарной обработки лесных грибов жителями загрязненных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС: 2 // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 109–116.

Поступила: 30.01.2025

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

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

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

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

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

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

Кравцова Ольга Сергеевна – кандидат биологических наук, исполняющая обязанности 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

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 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-7-17

The current levels of ^{137}Cs in foodstuffs of wild origin according to the results of radiation-hygienic survey of the Bryansk region settlements¹

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 on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Introduction: In natural ecosystems included in food chains with humans as the final link, high levels of ^{137}Cs were observed in the long-term period after the Chernobyl accident. The objective of this study was to describe current levels of ^{137}Cs in samples of foodstuffs from the Bryansk region settlements. Materials and Methods: An analysis of data on the ^{137}Cs concentration in 1837 samples of foodstuffs of wild origin from the Bryansk region settlements was taken. The ^{137}Cs concentration were measured using gamma spectrometry methods. Results of the Study and Discussion: Exceeding the permissible levels of ^{137}Cs concentration was found in all main categories of food products: mushrooms (40 % of the studied samples do not satisfy radiation safety requirements), wild berries (55 %), meat of game (50 %), and local fish (18 %). The total percentage of such kind of samples was 43 %.

Anzhelika A. Bratilova

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

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

Conclusion: Foodstuffs of wild origin dominate internal exposure dose of residents at the present time. The main dose-forming foodstuff is wild mushrooms.

Key words: the Chernobyl NPP, population, internal exposure, cesium-137, foodstuffs of wild origin.

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, editing of the text of the article.

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. – systematization of primary research materials.

Kaduka M.V. – processing and systematization of primary research materials, literature search, substantive editing of the text of the article.

Kravtsova O.S. – 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.

Acknowledgments

The authors express their gratitude and appreciation for assistance in the work to V.A. Yakovlev, O.S. Bazhenova and E.A. Drozdova (who were employees of the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. P.V. Ramzaev during the period of the study), as well as to the reviewers for constructive comments and recommendations, E.I. Zlotnikova (doctor on sanitary-hygienic laboratory studies of radiological laboratory of FBUZ CHE in the Bryansk region), A.V. Kudryashov (chief doctor of the branch of FBUZ CHE in Klinty, Bryansk region), V.A. Lalayan (deputy chief doctor for sanitary and epidemiological issues of the branch of FBUZ CHE in Klinty, Bryansk region), A.A. Ladik (expert-physicist for control of ionizing and non-ionizing radiation sources of the branch of FBUZ CHE in Klinty, 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 performed within the framework of the work under the state contract No. 0173100001419000019 dated 18.10.2019 with the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing.

References

1. Romanovich IK, Bazyukin AB, Barkovsky AN., Biblin AM, Bratilova AA, Bruk GYa, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 1: Characteristics of the settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 22-36. (In Russian). DOI:10.21514/1998-426x-2023-16-3-22-36
2. Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Varfolomeeva KV, Drozdova EA, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 2: Population's food preferences (diet). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 7-21. (In Russian). DOI:10.21514/1998-426x-2023-16-4-7-21.
3. Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Drozdova EA, Zhesko TV, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 3: Radionuclide content in agricultural food products. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 7-17. (In Russian). DOI:10.21514/1998-426x-2023-17-2-7-17.
4. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Varfolomeeva KV. Vertical distribution of ¹³⁷Cs in soddy-podzolic sandy soil in grasslands and forests of the Bryansk region in 2015–2016. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 27-41. (In Russian). DOI:10.21514/1998-426x-2019-12-3-27-41.
5. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ¹³⁷Cs: the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 37-46. (In Russian). DOI:10.21514/1998-426x-2019-12-4-37-46.
6. Kaduka MV, Basalaeva LN, Bekyasheva TA, Ivanov SA, Salazkina NV, Stupina VV, et al. Radioactive contamination of mushrooms in the late period after the Chernobyl accident. Radiation and hygienic consequences and lessons of the accident at the Chernobyl NPP and the Fukushima-1 NPP: Proceedings of the international scientific and practical conference. SPb: Federal Budgetary Scientific Institution St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev; 2021. P. 111–115. (In Russian).
7. Kaduka MV, Bekyasheva TA, Ivanov SA, Salazkina NV, Stupina VV. Features of accumulation of cesium isotopes by edible species of forest mushrooms. Modern problems of radiation medicine: from science to practice: Proceedings of the International scientific and practical conference. Gomel: State Institution "RSPC RMiECh"; 2022. P. 38–40. (In Russian).
8. Shcheglov AI. Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems: based on 10-year studies in the zone of influence of the Chernobyl accident. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. (In Russian).
9. Shilova KV. Contamination of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the forest products of the Bryansk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(2): 55–61. (In Russian).
10. Belarus and Chernobyl: 36 years later. Information and analytical materials. Minsk: Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus; 2022, 50 p.
11. Semenya IN. Radiation safety of food products produced in the Republic of Belarus. *Belaruskaya dumka = Belarusian Thought*. 2022; 4: 52–59. (In Russian).
12. Panov AV, Marochkina EV, Ponomarenko VV. On the role of mushrooms in the formation of internal radiation doses of the population living in areas contaminated with radioactivity as a result of the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 63–70. (In Russian).
13. Chernushevich GA, Azovskaya NO, Domnenkova AV, Kiselev SV. Analysis of the influence of radioactive contamination of "gifts of the forest" on the internal irradiation of the population. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Proceedings of the Belarusian State Technological University*. 2021;2(246): 298–305. (In Russian).

14. Chernushevich GA, Azovskaya NO, Kiselev SV. Study of the influence of radioactive contamination of forest gifts on internal irradiation of the population of Belarus. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Proceedings of the Belarusian State Technological University*. 2018;2(210): 288–294. (In Russian).
15. Panchenko SV, Panfilova AA. The role of forest ecosystems in the formation of radiation dose loads on the population: Preprint No. IBRAE-2000-01. Moscow: Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy, Russian Academy of Sciences: 2000. P. 50. (In Russian).
16. Shchur AV, Vinogradov DV, Ageeva TN, Shapsheeva TP, Gryazin VA. The influence of the radioecological situation in residential forest areas on internal radiation doses of rural residents. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Volga State Technological University*. 2016;1(29): 79–86. (In Russian).
17. Kaduka MV, Basalaeva LN, Bekyasheva TA, Ivanov SA, Salazkina NV, Stupina VV. Radiation indicators of food products in contaminated areas of Russia in the late period after the Chernobyl accident. Radiation technologies in agriculture and food industry: status and prospects: Collection of reports of the international scientific and practical conference. Obninsk: FGBNU VNIIRAE; 2018. P. 328–331.
18. Bratilova AA, Bruk GYa. Influence of the consumption of different foodstuffs on the internal exposure dose formation in the adult population of the Russian Federation after the accident at the Chernobyl NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2):53–59. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-53-59
19. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments: ISSN 0074–1914 472. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
20. Shabaleva MA, Bulko NI, Kozlov AK. Prediction for ¹³⁷Cs radioactive contamination of forest food products and average internal dose of organism exposure due to their consumption. *Problemy zdorov'ya i ekologii = Health and Ecology Issues*. 2014;2: 119–125. (In Russian). DOI:10.51523/2708-6011.2014-11-2-25
21. Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas / Eds: NI Sanzharova, SV Fesenko. Moscow: RAS; 2018. 278 p. (In Russian).
22. Shilova KV, Kaduka MV, Shutov VN. Dynamics of radioactive contamination of food products of natural origin after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009; 2(4): 23–26. (In Russian).
23. Shutov VN, Kaduka MV, Kravtsova OS, Parkhomenko VI, Samoilenko VM. Protection from radiation. Popular science manual. Spb: Textbook; 2011. 88 p. (In Russian).
24. Varfolomeeva KV, Zelentsova SA, Repin VS. Preferred techniques for forest mushrooms cooking by residents of contaminated areas of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2):109–116. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-109-116

Received: January 30, 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

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

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

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

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

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

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

For 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 foodstuffs of wild origin according to the results of the radiation-hygienic survey of the Bryansk region settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 7–17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-7-17

Оценка спектра и частоты хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников объекта использования атомной энергии на протяжении 15 лет трудовой деятельности

Т.В. Вишневская¹, М.Ю. Цыпленкова¹, Д.С. Исубакова¹, О.С. Цымбал¹,
И.В. Мильто^{1,2}, Р.М. Тахауов^{1,2}

¹ Северский биофизический научный центр, Федеральное медико-биологическое агентство, Северск, Россия

² Сибирский государственный медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Томск, Россия

Введение: Одним из наиболее чувствительных методов, широко используемых для оценки генотоксических эффектов ионизирующего излучения на организм человека в ранний и отдаленный периоды после облучения, является оценка спектра и частоты хромосомных aberrаций. В настоящей работе проведен сравнительный анализ частоты хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников объекта использования атомной энергии с ретроспективной исследования за 15 лет. Цель исследования заключалась в оценке динамики частоты хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников в 2003 г. и 2018 г. **Материалы и методы:** Оценка последствий воздействия ионизирующего излучения на организм человека выполнена путем цитогенетического обследования работников ($n=20$), подвергавшихся долговременному профессиональному внешнему облучению низкой интенсивности. Группу контроля составили работники, которым в 2003 г. проведен цитогенетический анализ. Группу исследования составили те же работники, которым в 2018 г. повторно проведен цитогенетический анализ. При формировании выборки исключали людей с сочетанным и/или внутренним облучением. **Результаты исследования и обсуждение:** При сравнении частот хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников выявлены различия между изучаемыми группами по частоте дицентрических хромосом ($p<0,05$). В группе исследования, по сравнению с группой контроля, повышена частота дицентрических хромосом ($p=0,0017$). Частоты других изученных типов хромосомных aberrаций (хромосомные фрагменты, хроматидные фрагменты и кольцевые хромосомы) не различались между сравниваемыми группами. **Заключение:** Сравнение спектра и частоты хромосомных aberrаций (2003 г.) лимфоцитов крови работников объекта использования атомной энергии с аналогичными показателями после 15 лет профессиональной деятельности (2018 г.), выявило увеличение частоты дицентрических хромосом. Данное цитогенетическое изменение может быть обусловлено пролонгированным комбинированным влиянием техногенного облучения ионизирующим излучением и нерадиационных вредных производственных факторов (химические вещества, физические факторы и др.), а также старением организма работников объекта использования атомной энергии.

Ключевые слова: хромосомные aberrации, дицентрические хромосомы, ионизирующее излучение, ретроспективный анализ, индивидуальная радиочувствительность.

Введение

В настоящее время источники ионизирующего излучения (ИИ) широко используются не только в промышленности, но и в медицине, научной работе и др. Одним из последствий воздействия ИИ на организм человека являются мутации в соматических клетках, которые способствуют возникновению радиогенных заболеваний или нарушений.

Одним из неблагоприятных факторов, обуславливающих повышенный риск развития заболеваний различной этиологии, является профессиональное техногенное облучение ИИ [1]. В связи с широким использованием ИИ в различных сферах деятельности организм современного человека испытывает на себе последствия его воздействия.

Существенный вклад в коллективную эффективную дозу облучения вносят природные источники ИИ, на которые при-

ходит основная доля облучения населения, наряду с медицинским облучением и облучением от всех искусственных источников ИИ, в т. ч. от объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Облучение человека за счет естественного радиационного фона оценивается экспертами НКДАР ООН в среднем около 3,6 мЗв/год [2]. При этом около 84 % активности естественного радиационного фона обусловлено радионуклидами земной локализации. Стоит отметить, что характерной особенностью естественного радиационного фона нашей планеты является его неоднородность.

Данные научной литературы подтверждают актуальность проведения исследований по изучению последствий радиационного воздействия на население, проживающее вблизи ОИАЭ или на территориях, загрязненных радионуклидами. Одним из ярких примеров таких исследований является р. Теча и прилегающие к ней территории, которые

Вишневская Татьяна Валерьевна

Северский биофизический научный центр

Адрес для переписки: 636013, Томская область, г. Северск, пер. Чекист, 7, корп. 2; E-mail: Vishnenskaya_seversk@mail.ru

в 1949–1956 гг. были подвергнуты радиоактивному загрязнению ПО «Маяк» [3, 4]. На загрязненной территории в более чем 40 сельских населенных пунктах проживало порядка 30 000 человек. Позднее население пострадавшего региона было объединено исследователями в когорту р. Течи [5].

Особое внимание стоит уделить работникам, чья трудовая деятельность связана с воздействием ИИ. Несмотря на дозиметрический контроль и постоянное совершенствование методов радиационной защиты, остается актуальным вопрос о влиянии «малых» доз ИИ на здоровье работников ОИАЭ [6]. Медицинские работники также являются одной из наиболее крупных профессиональных когорт, подверженной воздействию ИИ. Данные многочисленных исследований показывают, что воздействию рентгеновских лучей подвергаются не только работники рентген-кабинетов, но и врачи, выполняющие рентгенохирургические вмешательства [7].

Влияние ИИ приводит к разрыву фосфодиэфирных связей между нуклеотидами ДНК, химической модификации азотистых оснований и конъюгации ДНК. Из-за этого в ДНК образуются однонитевые и двунитевые разрывы, внутри- и межмолекулярные сшивки, сшивки ДНК с белками хроматина или ядерного матрикса [8]. Некоторое количество повреждений клетка способна устранить с помощью системы репарации, однако возникновение большого количества дефектов ДНК (например, двунитевых разрывов) может привести к неполному восстановлению или к гибели клетки.

В настоящее время наиболее точным и чувствительным биомаркером ранних эффектов действия ИИ на организм человека является определение цитогенетических нарушений в лимфоцитах крови [9]. Культура лимфоцитов крови человека является признанной тест-системой, характеризующейся высокой чувствительностью, которая позволяет дифференцировать мутагенные эффекты химической и физической (включая ИИ) природы. Установлено, что химические агенты индуцируют в лимфоцитах крови человека в основном хромосомные aberrации (ХА) хроматидного типа, физические агенты – ХА хромосомного типа. Следует отметить, что дицентрические и кольцевые хромосомы являются маркерами воздействия ИИ, позволяющими осуществлять биологическую индикацию радиационного воздействия, а при облучении ИИ в «больших» дозах – и биологическую дозиметрию [10]. Анализ результатов цитогенетических исследований, выполненных в течение многолетних наблюдений за состоянием генома соматических клеток работников, участвовавших в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, продемонстрировал способность радиационно-индуцированных ХА сохраняться длительное время после облучения ИИ [11]. Среди специалистов в области радиационной медицины существует мнение, что облучение в «малых» дозах индуцирует развитие ряда патологических состояний, в частности, заболеваний сердечно-сосудистой, нервной, пищеварительной и эндокринной систем [12]. Это подтверждает актуальность исследований, направленных на поиск биологических маркеров, специфичных для радиационного воздействия в раннем и отдаленном периодах после облучения ИИ.

Цель исследования – оценить динамику частоты ХА в лимфоцитах крови работников ОИАЭ в 2003 г. и 2018 г.

Материалы и методы

Исследование проведено на 20 условно здоровых работников ОИАЭ, подвергавшихся действию ИИ в ходе своей профессиональной деятельности, из которых было сформиро-

вано две группы: группа контроля ($n = 20$, взятие крови и цитогенетическое исследование лимфоцитов крови проведено в 2003 г.) и группа исследования ($n = 20$, взятие крови проведено в 2018 г.). Группы были сформированы с учетом цитогенетических суспензий, имеющихся в банке биологического материала (ББМ) ФГБУН СБН Центр ФМБА России.

Критерии включения: хроническое профессиональное техногенное общее внешнее облучение ИИ низкой интенсивности, суммарная доза внешнего облучения не превышает 150 мЗв, отсутствие аварийного облучения, отсутствие хронических заболеваний.

Критерии исключения: наличие сочетанного или внутреннего облучения, доза облучения более 150 мЗв, сверхнормативное облучение, наличие хронических заболеваний.

Индивидуальные дозы внешнего облучения ИИ были получены в отделе охраны труда, ядерной и радиационной безопасности ОИАЭ. Источником медицинской информации о работниках ОИАЭ являлся архив медицинской документации и электронная база данных ББМ [13, 14]. Накопленная доза ИИ у работников, участвовавших в исследовании, за эти годы либо осталась прежней, либо незначительно увеличилась.

Каждый работник ОИАЭ, включенный в исследование, подписал добровольное информированное согласие на обработку своих персональных данных и использование биоматериала (венозной крови) для научных целей.

Для выборок вычисляли среднее арифметическое, стандартную ошибку среднего арифметического, медиану, интерквартильный размах.

Характеристики группы контроля и группы исследования приведены в таблице 1.

В качестве материала для исследования использовали венозную кровь. Первый забор крови и цитогенетический анализ послужил контролем для настоящего исследования. Через 15 лет после первой сдачи крови и оценки частоты ХА у этих же работников ОИАЭ был повторно взят биологический материал.

Культивирование образцов цельной венозной крови проводили следующим образом: к 16 мл RPMI 1640 (ПанЭко, Россия) с L-глутамином (ПанЭко, Россия) добавляли 4 мл крови, 4 мл инактивированной эмбриональной сыворотки (ПанЭко, Россия) и 0,4 мл фитогемагглютинаина (ПанЭко, Россия). Культуральные флаконы помещали в орбитальный шейкер-инкубатор (BiosanSia, Латвия) на 48 ч (37°C). За 1,5 ч до окончания инкубации в культуральные флаконы вносили колхицин (ПанЭко, Россия).

Цитогенетические препараты готовили по стандартной методике: гипотонизация 0,56%-м раствором хлорида калия, фиксация смесью этанола и ледяной уксусной кислоты (3:1). Окраску хромосом проводили красителем Гимза на фосфатном буфере. Цитогенетический анализ проводили на обезличенных цитогенетических препаратах (световой микроскоп Leica DM2500, Германия). У каждого работника изучали 300 метафазных пластинок. Оценивали цитогенетические нарушения хромосомного типа (хромосомные фрагменты, кольцевые и дицентрические хромосомы) и хроматидного типа (хроматидные фрагменты).

Результаты представлены в виде частоты ХА на 100 проанализированных метафазных пластинок. Для каждой группы определена частота обнаружения отдельных типов ХА (в % от общего числа работников). Обработку количественных результатов проводили в программе Statistica 8.0 (StatSoft, США): для каждого типа ХА вычисляли медиану и квартили, для сравнения количественных показателей между группами использовали непараметрический критерий Манна – Уитни. Статистически значимыми считали значения $p < 0,05$.

Таблица 1

Характеристика обследованных групп

[Table 1]

Characteristics of the surveyed groups

Показатель [Indicator]		Группа контроля (2003 г.) [Control group (2003)]	Группа исследования (2018 г.) [Study group (2018)]
Количество обследованных, чел. [Number of examined persons]		20	20
Мужчины/женщины, чел. [Men/women, persons]		13/7	13/7
Возраст, лет [Age, years]	M ± SE*	55,05 ± 8,23	69,80 ± 8,13
Стаж работы, лет [Work experience, years]	M ± SE	29,35 ± 11,39	44,5 ± 11,20
Доза внешнего облучения, мЗв [External radiation dose, mSv]	Медиана (L-R)* [Median(L-R)]*	101,07 (63,34-244,82)	106,94 (66,99-255,82)

* Здесь и далее: M – среднее арифметическое; SE – стандартная ошибка среднего арифметического; L-R – интерквартильный размах [Here and below: M is the arithmetic mean; SE is the standard error of the arithmetic mean; L-R is the interquartile range].

Результаты и обсуждение

Увеличение частоты цитогенетических нарушений в лимфоцитах крови работников объекта использования атомной энергии после 15 лет трудовой деятельности в условиях хронического профессионального техногенного облучения ионизирующим излучением может быть обусловлено как изолированным воздействием ионизирующего

излучения, так и совокупным его воздействием с нерадиационными вредными производственными факторами.

Цитогенетический анализ является признанным, наиболее доступным и хорошо воспроизводимым методом оценки токсического воздействия на организм различных факторов. Результаты анализа частоты ХА в группе контроля и группе исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2

Частота хромосомных aberrаций в исследуемых группах

[Table 2]

The frequency of chromosomal aberrations (CA) in the study groups

Тип ХА [Type of CA]	Частота ХА на 100 клеток, M (L-R) [Frequency of CA per 100 cells, M (L-R)]		p-value
	Группа контроля, 2003 г. (n* = 20) [Control group, 2003 (n = 20)]	Группа исследования, 2018 г. (n = 20) [Study group, 2018 (n = 20)]	
Аберрантные клетки [Aberrant cells]	2,63 (1,00-4,78)	2,55 (1,00-3,29)	0,6163
Хроматидные фрагменты [Chromatid fragments]	1,29 (0,33-1,98)	0,92 (0,32-1,00)	0,0507
Хромосомные фрагменты [Chromosome fragments]	0,76 (0,32-1,33)	0,88 (0,33-1,33)	0,4240
Кольцевые хромосомы [Ring chromosomes]	0,12 (0,00-0,32)	0,10 (0,00-0,32)	0,7639
Дицентрические хромосомы [Dicentric chromosomes]	0,29 (0,00-0,33)	0,52 (0,33-0,83)	0,0017**

* n – число обследованных в группе, p-value – уровень статистической значимости различий по критерию Манна – Уитни; ** – статистически значимые (p<0,05) различия показателей [n is the number of subjects in a group, p-value is the level of statistical significance of differences according to the Mann-Whitney test; statistically significant (p<0.05) differences in indicators are highlighted in bold].

Таблица 2 демонстрирует, что различия между изученными группами выявлены только по частоте дицентрических хромосом (p = 0,0017; рис. 1).

В группе контроля на дицентрические хромосомы приходится 40 % общего количества ХА, в группе исследования – 95 %.

В группе контроля большая часть ХА представлена хроматидными (рис. 2) и хромосомными (рис. 3) фрагментами – 85 % (17 случаев из 20). В группе исследования 95 % ХА представлены дицентрическими хромосомами (19 случаев из 20) и 90%-хромосомными фрагментами (18 случаев из 20).

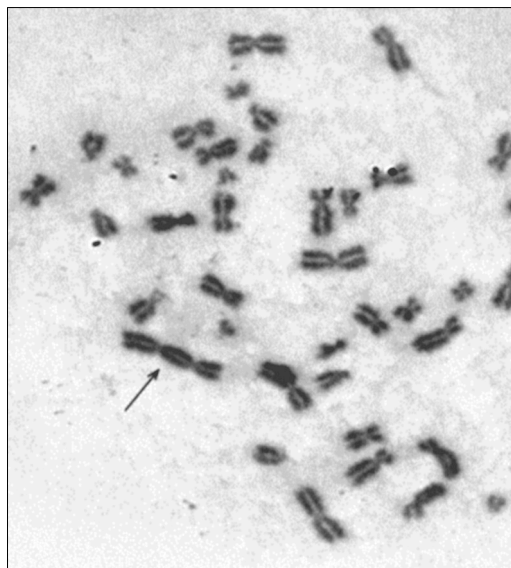


Рис. 1. Метафазная пластинка, содержащая дицентрическую хромосому
[Fig. 1. A metaphase plate containing a dicentric chromosome]

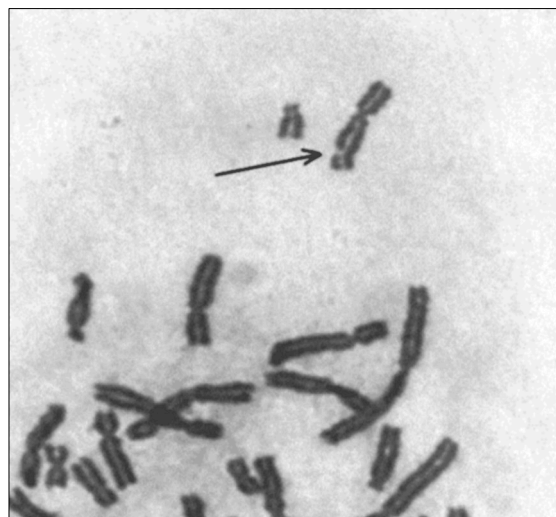


Рис. 2. Аберрация хроматидного типа: одиночный разрыв
[Fig. 2. Chromatid type aberration: single-strand break]

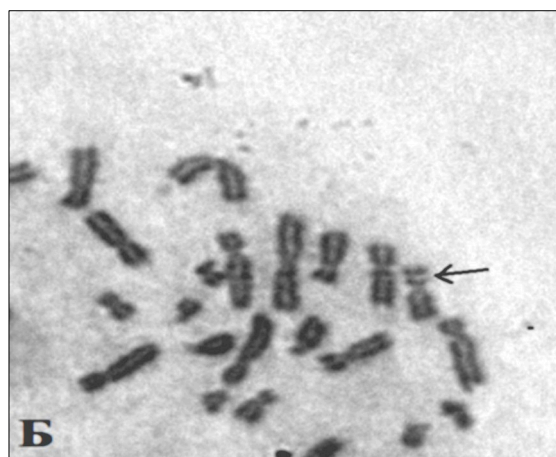
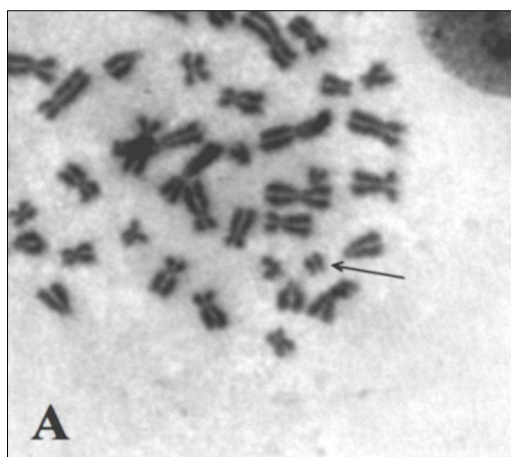


Рис. 3. Аберрации хромосомного типа: парный фрагмент (А) и парный разрыв хромосомы (Б)
[Fig. 3. Chromosomal aberrations: paired fragment chromosome (A) and paired chromosome break (B)]

Процентное соотношение хроматидных фрагментов и кольцевых хромосом в изучаемых группах оказалось одинаковым, в то время как процент хромосомных фрагментов и дицентрических хромосом увеличился. Кольцевые хромосомы в обеих группах составили 30 % от общего количества ХА.

Важным компонентом изучения генотоксического действия факторов производственной среды на человека являются эпидемиологические исследования, в частности, сопоставление результатов цитогенетического анализа с наличием профессионально обусловленных заболеваний. Изучение связи цитогенетических нарушений с состоянием здоровья работников предприятий химической отрасли проведено в работе Харченко Т.В. и соавторов. [15]. Авторами выполнен цитогенетический анализ у 138 работников химически опасных предприятий. Установлено статистиче-

ски значимое повышение частоты ХА у работников с подтвержденными профессионально обусловленными заболеваниями. Выявлено статистически значимое увеличение количества работников с частотой ХА свыше 5 % ($p < 0,01$) и/или носителей дицентрических и кольцевых хромосом ($p < 0,05$). Исследование Харченко Т.В. и соавторов подтверждает роль генотоксических производственных факторов в возникновении заболеваний.

Результаты нашей работы схожи с данными, полученными в ходе ретроспективного (16-46 лет после радиационного воздействия) цитогенетического исследования людей, подвергавшихся воздействию ИИ в результате испытаний ядерного оружия на Семипалатинском ядерном полигоне [16]. Показано, что у людей через 16 лет после облучения ИИ в дозах 42,0-150,0 сГр регистрировали наиболее высокую частоту ХА. Например, доля хромосомных и хро-

матидных фрагментов, дицентрических и кольцевых хромосом достоверно превышала аналогичные показатели группы контроля. Через 25-46 лет также отмечено превышение частоты ХА по сравнению с группой контроля, однако их частота снизилась в 2 раза по сравнению с предыдущим периодом.

Исследование по изучению биологических эффектов «малых» доз среди работников, участвовавших в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, также продемонстрировало способность радиационно-индуцированных ХА сохраняться в течение длительного времени после облучения ИИ [17].

В прошлом веке на ПО «Маяк» произошло несколько аварий, в ходе которых облучению ИИ подверглось население, проживающее на территориях, прилегающих к ОИАЭ (более 100 000 человек). Работники УНПЦ РМ ФМБА России (г. Челябинск) ведут наблюдение за состоянием здоровья этого населения и их потомков, а также изучают медико-биологические последствия воздействия ИИ на организм облученных людей [18]. Ими установлено повышение частоты нестабильных ХА у населения после воздействия ИИ по сравнению с лицами, не подвергавшимися аварийному облучению ИИ. Вместе с тем, у этих людей было отмечено снижение частоты ХА в 2 раза через 25 и 50 лет после облучения ИИ. Подобные результаты объясняются элиминацией поврежденных соматических клеток. Показано, что при 2-м митозе частота клеток с дицентрическими хромосомами снижается на 50 %. Коллеги из УНПЦ РМ ФМБА России выяснили, что частота ХА коррелирует с возрастом человека: у новорожденных детей дицентрические хромосомы в лимфоцитах крови не выявляются, а по мере взросления количество лимфоцитов крови с ХА увеличивается [18]. Этот результат исследования коллег [18] вызывает интерес и служит предпосылкой для дальнейшего исследования. Результаты работы УНПЦ РМ ФМБА России подтверждают, что повышенная частота ХА является не только маркером воздействия ИИ, но и маркером клеточного старения.

Ввиду отсутствия значимого увеличения суммарной дозы внешнего облучения в группе исследования на протяжении 15 лет профессиональной деятельности, увеличение частоты дицентрических хромосом может быть обусловлено действием нерадиационных вредных производственных факторов (сильные кислоты, толуол, пыль, повышенная температура и др.).

Следует отметить, что увеличение частоты ХА, в частности, дицентрических хромосом может быть обусловлено старением организма работников ОИАЭ. Общеизвестно, что с возрастом снижается активность и эффективность работы систем репарации ДНК, вследствие этого они становятся не в состоянии элиминировать возникающие ХА даже при условии, что частота их формирования не изменилась. Это обстоятельство приводит к накоплению ХА в клетках и увеличению частоты их определения с возрастом.

При оценке мутагенного действия ИИ в различных группах облученных лиц нельзя не учитывать межпопуляционную генетическую гетерогенность и индивидуальную радиочувствительность [19], которая является полигенным признаком, зависящим от взаимодействия многих генов и их продуктов, участвующих в регуляции разнообразных клеточных процессов [20]. Генетическое многообразие, которым обладают

клетки одной ткани, позволяет им по-разному реагировать на генотоксическое воздействие, запуская механизмы восстановления или апоптоза без ущерба для деятельности ткани и организма. От индивидуальных особенностей клеток организма зависит мутагенный эффект ИИ и радиопооражаемость различных тканей [21].

Для проведения широкомасштабных генетических исследований с привлечением новейших молекулярно-генетических технологий необходим тщательный подбор групп с возможным учетом вышеперечисленных параметров, включая демографические данные [22].

Результаты данной работы позволяют дополнить представления о мутационном процессе в соматических клетках лиц, которые подвергаются воздействию ИИ в ходе профессиональной деятельности. Корректная интерпретация результатов цитогенетического обследования работников ОИАЭ возможна только при наличии информации об исходной частоте ХА, которая зависит от места и условий проживания, а также влияния производственных и бытовых факторов генотоксического характера.

Выявленные статистические различия частоты дицентрических хромосом заслуживают особого внимания, так как наличие этого типа ХА является маркером радиационного воздействия и позволяет верифицировать факт облучения ИИ. Кроме того, ретроспективный цитогенетический анализ может использоваться для определения степени генетических нарушений при воздействии ИИ не только при профессиональной деятельности, но и в медицинских целях.

Отсутствие значимого увеличения частоты абберрантных клеток в группе исследования при увеличении частоты дицентрических хромосом может быть связано с особенностями учёта ХА в нашем исследовании. Так, к абберрантным клеткам относили лимфоциты, имеющие один любой из изученных типов ХА; клетки, имеющие множество ХА (более 5 ХА), учитывали как мультиабберрантные клетки (данные не приведены). Отсутствие увеличения частоты абберрантных клеток при условии повышения частоты дицентрических хромосом может быть обусловлено ростом частоты мультиабберрантных клеток.

Отдельной задачей для специалистов радиологического профиля является оценка последствий лучевой терапии для пациента на основе цитогенетического исследования [23, 24]. Работниками МРНЦ им. А.Ф. Цыба (г. Обнинск) была проведена ретроспективная оценка тяжести отдаленных лучевых повреждений у пациентов со злокачественными новообразованиями (ЗНО) методом цитогенетического исследования лимфоцитов крови. В группе были представлены пациенты с болезнью Ходжкина, раком молочной железы, раком предстательной железы, раком шейки и тела матки и ЗНО костей. В работе МРНЦ им. А.Ф. Цыба показано, что повышенная частота стабильных ХА в лимфоцитах крови пациентов с ЗНО различной локализации сохраняется на протяжении нескольких лет после лучевой терапии. Локализация опухоли при этом не имеет существенного значения. Отмечено, что важную роль играет продолжительность периода времени между окончанием лучевой терапии и проведением цитогенетического анализа. Для ретроспективной оценки частоты стабильных ХА необходимо использовать соответствующий дозовый коэффициент. Половина обследованных пациентов с ЗНО относится к группе повышенного риска вторичных ЗНО по причине обнаружения у них мультиабберрантных клеток, которые возникают вследствие сложных нерепарируемых повреждений ДНК [25].

Одной из основных целей ретроспективной биодозиметрии является прогноз развития возможных отдаленных последствий длительного облучения ИИ. Биодозиметрическое исследование рекомендуется проводить в ранние сроки после воздействия на организм ИИ, так как с течением времени точность оценки дозы облучения ИИ снижается. Данные биодозиметрического исследования могут быть использованы для проведения медико-социальной экспертизы в более поздние сроки после воздействия ИИ, если в ранние сроки после облучения оно по тем или иным причинам не проводилось [26].

Заключение

Выявленное повышение частоты дицентрических хромосом в лимфоцитах крови работников ОИАЭ спустя 15 лет профессиональной деятельности может быть обусловлено пролонгированным комбинированным влиянием техногенного облучения ИИ и нерадиационных вредных производственных факторов (химические вещества, физические факторы и др.), а также старением организма работников.

В дальнейшем для полноты и точности ретроспективного анализа планируется провести исследование на большей выборке с учетом имеющихся заболеваний, индивидуальных особенностей, а также вредных привычек (в первую очередь, курения) у исследуемых индивидов.

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.

Вишневская Т.В. – написание текста статьи, анализ и интерпретация данных, проведение экспериментов, сбор и анализ литературного материала, разработка концепции и дизайна исследования.

Цыпленкова М.Ю. – проведение экспериментов, сбор и обработка материалов.

Исубакова Д.С. – разработка концепции и дизайна исследования, осуществление внутреннего аудита.

Цымбал О.С. – проведение экспериментов, сбор и анализ литературного материала.

Мильто И.В. – научное редактирование текста, проверка критически важного интеллектуального содержания.

Тахауов Р.М. – осуществление общего научного руководства исследованием, утверждение окончательного варианта рукописи.

Благодарности

Исследование выполнено на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Северский биофизический научный центр» Федерального медико-биологического агентства (г. Северск). Авторы признательны директору Тахауову Р.М. и всем сотрудникам центра за помощь в проведении исследования. Выражаем благодарность руководителю отдела молекулярной и клеточной радиобиологии Мильто И.В. за консультации и проверку интеллектуального содержания статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование выполнено в рамках государственного задания, тема НИР «Изучение связи однонуклеотидных полиморфизмов генов клеточного цикла с частотой хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников Сибирского химического комбината».

Литература

1. Агзамова Г.С. Цитогенетические изменения в клетках периферической крови у людей под воздействием различных химических веществ (первое сообщение) // *Acta Biomedica Scientifica*. 2010. № 1. С. 88-90.
2. Башилов Н.И. Естественные источники ионизирующего излучения // *Молодой ученый*. 2018. № 24 (210). С. 277-282.
3. Burkart W., Jung T. Health risk from combined exposure: mechanistic considerations on deviation from additivity // *Mutation Research*. 1998. Vol. 411. P. 119-128. DOI: 10.1016/s1383-5742(98)00011-8.
4. Малиновский Г.П., Васильев А.В., Онищенко А.Д. Ретроспективная оценка уровней облучения населения уральского региона, проживающего на загрязненной территории, от естественных источников ионизирующего излучения // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*, 2017. № 2(18). С. 83-89.
5. Аклеев А.В., Дегтерева М.О., Крестинина Л.Ю. Радио-эпидемиологические исследования на Урале: итоги и перспективы // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 4. С. 31-44. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44.
6. Вишневская Т.В., Исубакова Д.С., Цыпленкова М.Ю. и др. Сравнительный ретроспективный анализ результатов цитогенетических исследований работников объекта использования ионизирующего излучения // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2024. Т. 69, № 1. С. 61-66. DOI: 10.33266/1024-6177-2024-69-1-61-66.
7. Гордиенко Л.Д., Киселева Т.П., Гордиенко И.И., Цап Н.А. Развитие тиреоидной патологии у медицинских работников при хроническом воздействии ионизирующего излучения в малых дозах // *Уральский медицинский журнал*. 2021. № 5. С. 90-97. DOI: 10.52420/2071-5943-2021-20-5-90-97.
8. Шаброва Е.С., Раздувалова С.А. Влияние ионизирующего излучения на геном человека // *Экология и безопасность жизнедеятельности: Сборник статей XXI Международной научно-практической конференции (Пенза, 13-14 декабря 2021 г.)* / Под ред. В.А. Селезнева, И.А. Лукшина. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. С. 227-230.
9. Харченко В.П., Снигирева Г.П., Зотов В.К., Куликова Т.А. Некоторые аспекты медицинской деятельности по преодолению последствий Чернобыльской катастрофы // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016. Т. 56, № 3. С. 293-299. DOI: 10.7868/S0869803116030061.
10. Севаньяев А.В., Хвостунов И.К., Снигирева Г.П. и др. Сравнительный анализ результатов цитогенетических обследований контрольных групп лиц в различных отечественных лабораториях // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2013. Т. 53, № 1. С. 5-24. DOI: 10.7868/S0869803112060124.
11. Алексанин С.С., Слозина Н.М., Неронова Е.Г. Чрезвычайные ситуации и геном человека. СПб.: Политехника-сервис, 2010. 84 с.
12. Иванов В.К. Медицинские радиологические последствия Чернобыля для населения России: оценка радиационных рисков. М.: Медицина, 2002. 392 с.
13. Тахауов Р.М., Карпов А.Б., Зеренков А.Г. и др. Медико-дозиметрический регистр персонала Сибирского химического комбината – база для оценки эффектов хронического облучения // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2015. Т. 55, № 5. С. 467-473. DOI: 10.7868/S0869803115050124.

14. Takhaou R.M., Karpov A.B., Albach E.N. et al. The bank of biological samples representing individuals exposed to long-term ionizing radiation at various doses // *Biopreservation and Biobanking*. 2015. Vol. 13, No. 2. P. 72-78. DOI: 10.1089/bio.2014.0035.
15. Харченко Т.В., Аржавкина Л.Г., Синякин Д.А., Язенок А.В. Хромосомные нарушения у работников химически опасных предприятий с различным состоянием здоровья // *Гигиена и санитария*. 2015. Т. 94, № 8. С. 31-35.
16. Апсаликов К.Н., Мулдагалиев Т.Ж., Белихина Т.И. и др. Анализ и ретроспективная оценка результатов цитогенетических обследований населения Казахстана, подвергавшегося радиационному воздействию в результате испытаний ядерного оружия на Семипалатинском полигоне, и их потомков // *Медико-биологические проблемы жизнедеятельности*. 2013. Т. 9, № 1. С. 42-49.
17. Neronova E., Slozina N., Nikiforov A. Chromosome alterations in cleanup workers sampled years after the Chernobyl accident // *Radiation Research*. 2003. Vol. 160, No. 1. P. 46-51. DOI: 10.1667/0033-7587(2003)160[0046:CAICWS]2.0.CO;2
18. Возилова А.В. Оценка влияния хронического облучения на преждевременное старение Т-лимфоцитов человека на основе нестабильных хромосомных aberrаций // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2023. Т. 25, № 2. С. 85-90. DOI: 10.47183/mes.2023.015.
19. Pond K.W., Doubrovinski K., Thorne C.A. WNT/ β -catenin Signaling in Tissue Self-Organization // *Genes (Basel)*. 2020. Vol. 11, No. 8. P. 939. DOI: 10.3390/genes11080939.
20. Chen G., Chen W., Ye M. et al. TRIM59 knockdown inhibits cell proliferation by down-regulating the WNT/ β -catenin signaling pathway in neuroblastoma // *Bioscience Reports*. 2019. Vol. 39, No. 1. P. BSR20181277. DOI: 10.1042/BSR20181277.
21. Liu J., Xiao Q., Xiao J. et al. Wnt/ β -catenin signalling: function, biological mechanisms, and therapeutic opportunities // *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2022. Vol. 7, No. 1. P. 3. DOI: 10.1038/s41392-021-00762-6.
22. Risch N.J. Searching for genetic determinants in the new millennium // *Nature*. 2000. Vol. 405. P. 847-856. DOI: 10.1038/35015718.
23. Vorobtsova I., Darroudi F., Semyonov A. et al. Analysis of chromosome aberrations by FISH and Giemsa assays in lymphocytes of cancer patients undergoing whole-body irradiation: comparison of *in vivo* and *in vitro* irradiation // *International Journal of Radiation Biology*. 2001. Vol. 77, No. 11. P. 1123-1131. DOI: 10.1080/09553000110075527.
24. Kutsuki S., Ihara N., Shigematsu N. et al. Relation between chromosomal aberrations and radiation dose during the process of TBI // *Radiation Medicine*. 2005. Vol. 23, No. 1. P. 37-42.
25. Хвостунов И.К., Курсова Л.В., Шепель Н.Н. и др. Ретроспективная оценка тяжести отдаленных лучевых повреждений онкологических пациентов методом цитогенетического обследования // *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2022. Т. 31, № 3. С. 87-99. DOI: 10.21870/0131-3878-2022-31-3-87-99.
26. Иванова Т.В. Цитогенетические методы исследования: возможности лабораторной диагностики и информативность для врача // *Терапевт*. 2020. № 5. С. 12-19. DOI: 10.33920/MED-12-2005-02.

Поступила: 22.10.2024

Вишневская Татьяна Валерьевна – младший научный сотрудник, Северский биофизический научный центр, Федеральное медико-биологическое агентство. **Адрес для переписки:** 636013, Россия, Томская область, г. Северск, пер. Чекист, 7, корп. 2; E-mail: Vishnevskaya_seversk@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2264-0546

Цыпленкова Мария Юрьевна – младший научный сотрудник, Северский биофизический научный центр, Федеральное медико-биологическое агентство, Северск, Россия
ORCID: 0009-0001-9932-0180

Исубакова Дарья Сергеевна – научный сотрудник, Северский биофизический научный центр, Федеральное медико-биологическое агентство, Северск, Россия
ORCID: 0000-0002-5032-9096

Цымбал Ольга Сергеевна – научный сотрудник, Северский биофизический научный центр, Федеральное медико-биологическое агентство, Северск, Россия
ORCID: 0000-0002-2311-0451

Мильто Иван Васильевич – доктор биологических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, Северский биофизический научный центр, Федеральное медико-биологическое агентство; заведующий кафедрой морфологии и общей патологии, Сибирский государственный медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Томск, Россия
ORCID: 0000-0002-9764-4392

Тахауов Равиль Манихович – доктор медицинских наук, профессор, директор, Северский биофизический научный центр, Федеральное медико-биологическое агентство; профессор кафедры организации здравоохранения и общественного здоровья, Сибирский государственный медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Томск, Россия
ORCID: 0000-0002-1994-957X

Для цитирования: Вишневская Т.В., Цыпленкова М.Ю., Исубакова Д.С., Цымбал О.С., Мильто И.В., Тахауов Р.М. Оценка спектра и частоты хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников объекта использования атомной энергии на протяжении 15 лет трудовой деятельности // *Радиационная гигиена*. 2025. Т. 18, № 1. С. 18–26. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-18-26

Assessment of the spectrum and frequency of chromosomal aberrations in blood lymphocytes of employees of an atomic energy facility during 15 years of work

Tatyana V. Vishnevskaya¹, Maria Yu. Tsyplenkova¹, Daria S. Isubakova¹,
Olga S. Tsymbal¹, Ivan V. Milto^{1,2}, Ravil M. Takhauov^{1,2}

¹ Seversk Biophysical Research Center, Federal Medical Biological Agency, Seversk, Russia

² Siberian State Medical University, Ministry of the Health of the Russian Federation, Tomsk, Russia

Introduction: One of the most sensitive methods widely used to assess genotoxic effects on the human body in the early and long-term periods is the assessment of chromosomal aberrations. The study was focused on comparative analysis of the frequency of chromosomal aberrations in the blood lymphocytes of personnel (n = 20) of an atomic energy facility with a 15-year retrospective study. The aim of the study was to assess the dynamics of the frequency of chromosomal aberrations in the lymphocytes of the blood of atomic energy facility workers for 15 years. Materials and Methods: The assessment of the effects of ionizing radiation on the human body was performed by cytogenetic examination of the employees of the atomic energy facility (n = 20) exposed to ionizing radiation during their professional activities. The control group was composed of employees of the atomic energy facility, who underwent cytogenetic analysis in 2003. The study group was made up of the same employees of the atomic energy facility, who had been underwent a second cytogenetic study in 2018. Results and Discussion: A comparative analysis of the frequency of cytogenetic disorders in the blood lymphocytes of the atomic energy facility workers revealed differences between the studied groups in the frequency of dicentric chromosomes ($p < 0.05$). In the study group, compared with the control group, an increase in the frequency of dicentric chromosomes was revealed ($p = 0.0017$). The frequencies of the other chromosomal aberrations types studied (chromosomal fragments, chromatid fragments, and ring chromosomes) did not differ between the groups compared. Conclusion: The results of this work make it possible to supplement and trace the understanding of the mutation process in the somatic cells of individuals who are exposed to ionizing radiation during their professional activities. The revealed statistical differences in the frequency of dicentric chromosomes deserve special attention, since the presence of this type of chromosomal aberrations is a marker of radiation exposure and allows us to verify the fact of exposure.

Key words: chromosomal aberrations, dicentric chromosomes, ionizing radiation, retrospective analysis, individual radiosensitivity.

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).

Tatyana V. Vishnevskaya – writing the main part of the text, analyzing and interpreting data, conducting experiments, collecting and analyzing literary material, developing the concept and design of the study.

Maria Yu. Tsyplenkova – conducting experiments, collecting and processing materials.

Daria S. Isubakova – development of the concept and design of the study, implementation of internal audit.

Olga S. Tsymbal – conducting experiments, analyzing literary material.

Ivan V. Milto – scientific text editing, verification of critical intellectual content.

Ravil M. Takhauov provided general scientific management of the project, making final edits.

Acknowledgments

The research was carried out on the basis of the Federal State Budgetary Institution of Science "Seversk Biophysical Research Center" of the Federal Medical-Biological Agency (Seversk). The authors are grateful to director Ravil M. Takhauov and all employees of the center for the assistance in conducting the study. The authors express their grati-

tude to the head of the laboratory of molecular and cellular radiobiology Ivan V. Milto for consultations in the work and verification of the intellectual content of the article.

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 task, the research topic is "Studying the relationship of single-nucleotide polymorphisms of cell cycle genes with the frequency of chromosomal aberrations in blood lymphocytes of employees of the Siberian Chemical Plant".

References

1. Agzamova GS. Cytogenetic changes in peripheral blood cells in humans under the influence of various chemicals (first report). *Acta Biomedica Scientifica*. 2010;1: 88-90. (In Russian).
2. Bashilov NI. Natural sources of ionizing radiation. *Moloday uchenyy = Young scientist*. 2018;24(210): 277-282. (In Russian).
3. Burkart W, Jung T. Health risk from combined exposure: mechanistic considerations on deviation from additivity. *Mutation Research*. 1998;411: 119-128. DOI: 10.1016/s1383-5742(98)00011-8.
4. Malinovsky GP, Vasilyev AV, Onishchenko AD. Retrospective assessment of exposure to natural ionizing radiation for population living in the radioactively contaminated area in Ural region. *Biosfernaya sovvestimost: chelovek, region, tekhnologii = Biospheric compatibility: human, region, technologies*. 2017;2(18): 83-89. (In Russian).

Tatyana V. Vishnevskaya

Seversk Biophysical Research Center

Address for correspondence: Chekist Lane, 7, building 2, Seversk, 636013, Russia; E-mail: Vishnevskaya_seversk@mail.ru

5. Akleyev AV, Degteva MO, Krestinina LYu. Radioepidemiological Studies in the Urals: Outcomes and Future Directions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 31-44. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44. (In Russian).
6. Vishnevskaya TV, Isubakova DS, Tsyplenkova MYu, Tsymbal OS, Milto IV, Takhaouov RM. Comparative retrospective analysis of the results of cytogenetic studies of workers at a facility using ionizing radiation. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2024;69(1): 61-66. DOI: 10.33266/1024-6177-2024-69-1-61-66. (In Russian).
7. Gordienko LD, Kiseleva TP, Gordienko II, Tape NA. Development of thyroid pathology in medical workers under chronic exposure to ionizing radiation in low doses. *Uralskiy meditsinskiy zhurnal = Ural Medical Journal*. 2021;20(5): 90-97. DOI: 10.52420/2071-5943-2021-20-5-90-97. (In Russian).
8. Shabrova ES, Razduvalova SA. In the pouring of ionizing radiation on the human genome. Ecology and life safety: Collection of articles of the XXI International Scientific and Practical Conference (Penza, December 13-14, 2021) / Ed. by VA Seleznev, IA Lukshin. Penza: Penza State Agrarian University; 2021. P. 227-230.
9. Kharchenko VP, Snigireva GP, Zotov VK, Kulikova TA. Some aspects of medical activities to overcome the consequences of the Chernobyl disaster. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(3): 293-299. DOI: 10.7868/S0869803116030061. (In Russian).
10. Sevankaev AV, Khvostunov IK, Snigiryova GP, Novitskaya NN, Antoschina MM, Fesenko EV, et al. Comparative Analysis of Cytogenetic Examination of Control Groups of Subjects Carried out in Different Russian Laboratories. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2013;53(1): 5-24. (In Russian). DOI: 10.7868/S0869803112060124.
11. Aleksanin SS, Slozina NM, Neronova EG. Emergencies and the human genome. St. Petersburg: Politehnika-service; 2010. 84 p. (In Russian).
12. Ivanov VK. Medical radiological consequences of Chernobyl for the population of Russia: Assessment of radiation risks. Moscow: Medicina; 2002. 392 p. (In Russian).
13. Takhaouov RM, Karpov AB, Zerenkov AG, Ovchinnikov AV, Izmetiev KM, Spasibenko PV, et al. Medical and dosimetric register of the personnel of the Siberian chemical plant – a basis for assessing the effects of chronic exposure. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2015;55(5): 467-473. DOI: 10.7868/S0869803115050124. (In Russian).
14. Takhaouov RM, Karpov AB, Albach EN, Khalyuzova MV, Freidin MB, Litviakov NV, et al. The Bank of Biological Samples Representing Individuals Exposed to Long-Term Ionizing Radiation at Various Doses. *Biopreservation and Biobanking*. 2015;13(2): 72-78. DOI: 10.1089/bio.2014.0035.
15. Kharchenko TV, Arzhavkina LG, Siniachkin DA, Yazenok AV. Chromosomal disorders in workers of chemically hazardous enterprises with the different health status. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2015;94(8): 31-35. (In Russian).
16. Apsalikov KN, Muldagaliev TZh, Belikhina TI, Tanatova ZA, Kenzhina LB. Retrospective analysis and evaluation of the results of cytogenetic studies of Kazakhstan's population has been subjected to radiation and their descendants, as a result of nuclear tests at the Semipalatinsk test site. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeystel'nosti = Medical and Biological Problems of Life Activity*. 2013;9(1): 42-49. (In Russian).
17. Neronova E, Slozina N, Nikiforov A. Chromosome alterations in cleanup workers sampled years after the Chernobyl accident. *Radiation Research*. 2003;160(1): 46-51. DOI: 10.1667/0033-7587(2003)160[0046:CAICWS]2.0.CO;2.
18. Vozilova AV. Assessment of the effect of chronic radiation on premature aging of human T-lymphocytes based on unstable chromosomal aberrations. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Extreme Medicine*. 2023;25(2): 85-90. DOI: 10.47183/mes.2023.015. (In Russian).
19. Pond KW, Doubrovinski K, Thorne CA WNT/ β -catenin Signaling in Tissue Self-Organization. *Genes (Basel)*. 2020;11(8): 939. DOI: 10.3390/genes11080939.
20. Chen G, Chen W, Ye M, Tan W, Jia B. TRIM59 knockdown inhibits cell proliferation by down-regulating the WNT/ β -catenin signaling pathway in neuroblastoma. *Bioscience Reports*. 2019;39(1): BSR20181277. DOI: 10.1042/BSR20181277.
21. Liu J, Xiao Q, Xiao J, Niu C, Li Y, Zhang X, et al. Wnt/ β -catenin signalling: function, biological mechanisms, and therapeutic opportunities. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2022;7(1): 3. DOI: 10.1038/s41392-021-00762-6.
22. Risch NJ. Searching for genetic determinants in the new millennium. *Nature*. 2000;405: 847-856. DOI: 10.1038/35015718.
23. Vorobtsova I, Darroudi F, Semyonov A, Kanayeva A, Timofeyeva N, Yakovleva T, et al. Analysis of chromosome aberrations by FISH and Giemsa assays in lymphocytes of cancer patients undergoing whole-body irradiation: comparison of *in vivo* and *in vitro* irradiation. *International Journal of Radiation Biology*. 2001;77(11): 1123-1131. DOI: 10.1080/09553000110075527.
24. Kutsuki S, Ihara N, Shigematsu N, Okamoto S, Kubo A. Relation between chromosomal aberrations and radiation dose during the process of TBI. *Radiation Medicine*. 2005;23(1): 37-42.
25. Khvostunov IK, Kursova LV, Shepel NN, Korovchuk ON, Korotkov VA, Khvostunova TI. Retrospective assessment of the severity of long-term radiation injuries in oncological patients by cytogenetic examination. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2022;31(3): 87-99. DOI: 10.21870/0131-3878-2022-31-3-87-99. (In Russian).
26. Ivanova TV. Cytogenetic examination methods: opportunities for laboratory diagnostics and information content for the doctor. *Terapevt = Therapist*. 2020;5: 12-19. DOI: 10.33920/MED-12-2005-02. (In Russian).

Received: October 22, 2024

For correspondence: Tatyana V. Vishnevskaya – Junior Researcher, Seversk Biophysical Research Center, Federal Medical Biological Agency (Chekist Lane, 7, building 2, Seversk, 636013, Russia; E-mail: Vishnevskaya_seversk@mail.ru)

ORCID: 0000-0003-2264-0546

Maria Yu. Tsyplenkova – Junior Researcher, Seversk Biophysical Research Center, Federal Medical Biological Agency, Seversk, Russia

ORCID: 0009-0001-9932-0180

Daria S. Isubakova – Researcher; Seversk Biophysical Research Center, Federal Medical Biological Agency, Seversk, Russia

ORCID: 0000-0002-5032-9096

Olga S. Tsymbal – Researcher; Seversk Biophysical Research Center, Federal Medical Biological Agency, Seversk, Russia

ORCID: 0000-0002-2311-0451

Ivan V. Milto – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research, Head of the Department of Molecular and Cellular Radiobiology, Seversk Biophysical Research Center, Federal Medical Biological Agency; Head of the Department of Morphology and General Pathology, Siberian State Medical University, Ministry of the Health of the Russian Federation, Tomsk, Russia

ORCID: 0000-0002-9764-4392

Ravil M. Takhaouov – Doctor of Medical Sciences, Professor, Director, Seversk Biophysical Research Center, Federal Medical Biological Agency; Professor of the Department of Healthcare Organization and Public Health, Siberian State Medical University, Ministry of the Health of the Russian Federation, Tomsk, Russia

ORCID: 0000-0002-1994-957X

For citation: Vishnevskaya T.V., Tsyplenkova M.Yu., Isubakova D.S., Tsymbal O.S., Milto I.V., Takhaouov R.M. Assessment of the spectrum and frequency of chromosomal aberrations in blood lymphocytes of employees of an atomic energy facility during 15 years of work. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 18–26. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-18-26

Анализ радиопротекторных свойств фумарата 3-гидроксипиридина на модели беспозвоночного животного после облучения протонами в опытах *in vivo*

О.В. Кузьмичева¹, Д.В. Ускалова¹, Д.Т. Дегтярева¹, Т.В. Уланова¹, С.В. Шкавров¹,
Е.И. Сарапульцева²

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института, Обнинск, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

Целью статьи является анализ радиопротекторных и антиоксидантных свойств фумарата 3-гидроксипиридина при облучении протонами модельного тест-организма в опытах *in vivo*. В качестве тест-организма использована лабораторная культура беспозвоночных животных из подотряда ракообразные *Daphnia magna*. Синтезированная авторами соль фумарата 3-гидроксипиридина представляла собой растворимое в спирте и воде белое кристаллическое вещество – соль 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина и фумаровой кислоты, выделенное из этанола. Острое облучение тест-организма проведено на протонном комплексе «Прометейс» в МРНЦ им. А.Ф. Цыба (Обнинск, Россия) сканирующим пучком протонов в дозе 30 Гр (энергия 150 МэВ) в распределенном пике Брэгга. Выживаемость *Daphnia magna* оценивали в 21-суточном эксперименте на ежедневной основе. Цитотоксичность исследуемых факторов анализировали колориметрическим методом по изменению метаболической активности клеток многоклеточного тест-организма, антиоксидантные свойства фумарата 3-гидроксипиридина оценивали по изменению активности ферментов каталазы, пероксидазы и супероксиддисмутазы. Оценку вклада анализируемых факторов в наблюдаемые эффекты проводили тестом Краскела-Уоллиса. Статистическую обработку выживаемости осуществляли по критерию χ^2 , остальных показателей – по критерию Манна-Уитни с поправкой на множественное сравнение. Согласно полученным данным, выживаемость облученных новорожденных животных снижалась к 21-суточному возрасту на 29,3 % ($p=0,03$). При совместном с фумаратом 3-гидроксипиридином действии гибель животных снижалась на 56,6 % ($p=8,8 \times 10^{-4}$). Выявлено, что основной вклад (85 %) в совместный эффект вносило облучение. Интегральная оценка уровня оксидативного стресса показала, что облучение протонами вызывает цитотоксический эффект в клетках тест-организма. Фумарат 3-гидроксипиридин не оказывает радиопротекторного и антиоксидантного действия при культивировании *Daphnia magna* в растворе вещества с концентрацией 50 мг/мл после облучения протонами. Полученные результаты согласуются с данными об отсутствии радиопротекторных свойств фумарата 3-гидроксипиридина после облучения тяжелыми ионами. Авторы предполагают единый механизм взаимодействия фумарата 3-гидроксипиридина с плотнoионизирующим излучением разного типа (протонами, тяжелыми ионами, альфа-частицами), который не оказывает радиопротекторного действия. Необходимо продолжить поиск радиопротекторов для протонной терапии среди веществ другого класса.

Ключевые слова: облучение протонами, *Daphnia magna*, радиопротектор, антиоксидант, фумарат 3-гидроксипиридин.

Введение

Протонная терапия – один из современных видов лечения злокачественных новообразований. Он обладает рядом преимуществ перед фотонной терапией, например, формированием пика Брэгга с наибольшей дозой излучения в зоне мишени. При этом доза облучения, приходящаяся на ткани, окружающие опухоль, хоть и значительно снижается, но все еще наносит ущерб здоровым клеткам. Так оптимизация подходов к лучевой терапии остается актуальной задачей. Она предполагает разные методики, в том числе, использование радиопротекторов.

Надежный радиопротектор должен обладать цитопротекторными и антиоксидантными свойствами. С целью профилактики лучевых повреждений в литературе описываются малотоксичные протекторы природного происхождения: флавоноиды, фенольные кислоты, ликопины, алкалоиды, полисахариды и фитогормоны [1]. Анализ литературы показал, что производные 3-оксидина и 3-гидроксипиридина способны препятствовать перекисному окислению липидов и белков. Например, мексидол эффективно ингибирует свободно-радикальное окисление липидов биомембран и повышает активность антиоксидантных ферментов, таких как супероксиддисмутаза [2, 3]. Выявлено, что механизм анти-

Кузьмичева Ольга Владимировна

Обнинский институт атомной энергетики

Адрес для переписки: 249039, Россия, Калужская область, г. Обнинск, ул. Студгородок, д. 1; E-mail: kuzmichevaov20@oiate.ru

оксидантного действия мексидола сходен с таковым у еще одного химического вещества, описываемого в литературе как антиоксидант, фумарата 3-гидроксипиридина (фумарат 3-ГП) [4, 5]. Подвижный атом водорода гидроксильной группы фумарата 3-ГП может взаимодействовать с образующимися в ходе перекисного окисления липидов пероксидом (ROO•) и алкокси-радикалами (RO•) и инактивировать их в соответствии с формулой (1):



где AH – фумарат 3-ГП с подвижным атомом водорода; X• - радикальный инициатор или промежуточный радикальный продукт свободно-радикального окисления [2].

Входящая в состав фумарата 3-ГП фумаровая кислота активирует антиоксидантные сигнальные пути в организме, выполняя защитную роль в окислительном стрессе, например, в процессе воспаления [6, 7]. В работе [5] на беспородных крысах-альбиносах обнаружено, что фумарат 3-ГП проявляет выраженные кардиопротекторные свойства. Наряду со способностью инактивировать свободные радикалы фумарат 3-ГП изменяет активность антиоксидантных ферментов: повышает активность Se-зависимой глутатионпероксидазы и снижает активность индуцибельной NO-синтазы [8]. В литературе приведены сведения о фармакологической активности соединения в дозах 25 мг/кг на модели аллоксанового диабета, катехоламиновом повреждении миокарда, тканевой гипоксии, остром нарушении мозгового кровообращения; острого и хронического гепатита лабораторных крыс. Установлено наличие антигипоксического, кардио-, нейро- и гепатопротекторного действия у изучаемого соединения [9-12].

Цель исследования – анализ радиозащитных свойств фумарата 3-ГП на здоровые ткани окружения в опытах *in vivo* при облучении пучками протонов на примере беспозвоночного животного *Daphnia magna*, поскольку за последнее десятилетие существенно увеличилось применение протонной терапии в лечении злокачественных новообразований.

Материалы и методы

Культивирование тест-организма

В качестве модельного тест-организма использовали беспозвоночных многоклеточных животных *D. magna*, культивируемых более 12 лет в оптимальных условиях лаборатории отделения биотехнологий ИАТЭ НИЯУ МИФИ в климатостате (модель Р2) в дехлорированной дважды фильтрованной водопроводной воде согласно международному протоколу [13]. Беспозвоночные животные из подотряда ракообразные *D. magna* широко применяются в радиобиологических и экотоксикологических исследованиях благодаря высокой чувствительности к изменениям окружающей среды, клональному размножению, высокой плодовитости, короткому жизненному циклу, расшифрованному геному, простоте культивирования в лабораторных условиях и многому другому. Эти животные имеют органы обоняния в виде усиков, фасеточный глаз, почки, мозг, который располагается рядом с пищеводом, замкнутую систему кровообращения и двуостное сердце на спинной части прозрачного тела, покрытого тонкой хитиновой оболочкой. В лабораторных условиях *D. magna* размножаются партеногенетически,

производя амеиотические яйца. Эмбриональный период длится до 5 суток. Примерно к 10-суточному возрасту у *D. magna* завершается период созревания, и самка начинает вымет молоди. В течение жизненного цикла самка каждые 3-4 суток приносит до 40 новорожденных. Новорожденные животные имеют видимые невооруженным глазом размеры 0,7 – 0,9 мм в длину. Размер взрослых животных достигает 3 – 5 мм.

Общая характеристика фумарата 3-гидроксипиридина

Фумарат 3-ГП был синтезирован на кафедре химии ИАТЭ НИЯУ МИФИ в соответствии с методикой [8; 14]. Полученная соль фумарата 3-ГП представляла собой растворимое в спирте и воде белое кристаллическое вещество с температурой плавления 287 °С.

Для синтеза вещества 0,03 моль 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина и 0,015 моль фумаровой кислоты перемешивали в 70 мл этанола, кипятили 1 ч в колбе с обратным холодильником до полного растворения компонентов. Реакционную смесь охлаждали, выпавшие кристаллы отделяли фильтрованием и сушили при комнатной температуре. Выход продукта составил 89 %.

Облучение пучками протонов

Для анализа выживаемости проводили острое облучение односуточных *D. magna* в дозе 30 Гр на протонном комплексе «Прометеус» в МРНЦ им. А.Ф. Цыба (Обнинск, Россия) сканирующим пучком протонов (энергия 150 МэВ), покрывающего зону 65 × 70 мм с равномерностью 99 %. Размер одиночного пучка составлял 7,1 × 6,4 мм. Длительность вывода пучка – 150 мс, пауза между циклами – 1,8 с. Исследование проведено для варианта протонного облучения с пиком Брэгга, находящимся за пределами тест-объекта («прострельное» облучение) [15]. Такой вариант облучения и формирующаяся доза приходится на здоровые клетки окружения злокачественной опухоли за сеанс протонной терапии. Расчет и контроль дозы облучения проводили сотрудники центра коллективного пользования «Радиологические и клеточные технологии» ФГБУ «НМИЦ радиология» в МРНЦ им. А.Ф. Цыба. Для анализа цитотоксических и антиоксидантных свойств облучение животных проводили в 10-суточном возрасте.

Схема эксперимента

Для оценки выживаемости односуточных *D. magna* из третьего помета маточной культуры помещали в культуральную воду, распределив на следующие группы: контроль, облучение 30 Гр, фумарат 3-ГП и фумарат 3-ГП+30 Гр. *D. magna* из контрольной группы не подвергали воздействию исследуемых факторов и до 21-суточного возраста культивировали по одиночно в стеклянных лабораторных стаканах в условиях климатостата для анализа выживаемости. Для облучения протонами односуточных животных соответствующих групп переносили в пластиковые контейнеры с 20 мл культуральной воды. Эксперименты проведены в нескольких повторах. Облучение в дозе 30 Гр занимало около 30 мин. После облучения животных рассаживали поодиночно в стеклянные лабораторные стаканы с 50 мл воды и культивировали до 21-суточного возраста в условиях климатостата. В сумме в каждой контрольной и опытной группах было от 20 до 60 особей. Фумарат 3-ГП добавляли в концентрации 50 мг/мл [16]

соответствующие сосуды на одни сутки, а тем животных отмывали от фумарата и культивировали согласно протоколу. В группе сочетанного воздействия животных отмывали от фумарата, переносили в пластиковые контейнеры и облучали пучками протонов в дозе 30 Гр. Затем рассаживали по одиночно и культивировали до 21-суточного возраста в условиях климатостата. Пилотные опыты применения фумарата после облучения не выявили значимых отличий от контроля. Данные не приводятся. Для анализа биохимических показателей исследуемые группы формировали из особей 9-суточного возраста и облучали по вышеописанной схеме. Изменение МТТ-показателя (3-4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенилтетразолий (МТТ), уровня малонового диальдегида (МДА-показатель) и активности ферментов антиоксидантной защиты оценивали на следующие сутки после облучения

Анализ токсических и радиопротекторных свойств

Токсические свойства исследуемых факторов оценивали на ежедневной основе по критерию выживаемости *D. magna* в 21-суточном эксперименте. Культивировали животных в климатостате (модель Р2) при температуре 20 ± 1 °С, автоматическом регулировании освещения 12/12 день/ночь и вентилировании. Культуральную среду меняли еженедельно. Погибших и новорожденных животных учитывали и удаляли из экспериментальных сосудов. Кормили через сутки суспензией *Ch. vulgaris* в концентрации 2 мгС/л. В каждой контрольной и опытной группах было от 20 до 60 особей.

Анализ цитотоксических и антиоксидантных свойств

Цитотоксические и антиоксидантные свойства исследуемых факторов анализировали по изменению МТТ-показателя (3-4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенилтетразолий (МТТ), уровню малонового диальдегида (МДА-показатель) и активности ферментов антиоксидантной защиты (каталазы, пероксидазы и супероксиддисмутазы).

МТТ-показатель интегрально характеризует активность митохондриальных дегидрогеназ, соотношение живых и мертвых клеток подопытного организма и работу системы антиоксидантных ферментов [17]. МТТ-анализ проводили на следующие сутки после облучения по модифицированной авторами методике, анализируя метаболическую активность клеток в гомогенизированных образцах тест-организма [18]. В каждом образце было по 20 особей *D. magna*. Анализ проводили по изменению оптической плотности (ОП) подготовленных образцов на планшетном иммуноферментном анализаторе StatFax 2100 (Awareness Technology, США, VIS-модель) при длине волны 492 нм (фоновая 630 нм). Согласно методике, ОП образцов пропорциональна количеству фиолетово окрашенного формазана, образованного при восстановлении бесцветного 3-(4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенилтетразолия (МТТ) дегидрогеназами живых клеток. Всего в контрольных и опытных группах было проанализировано от 19 до 47 образцов.

МДА-показатель оценивали по модифицированной для проведения анализа на *D. magna* методике [19]. В каждый образец отбирали по 20 десятисуточных животных. Образцы для анализа гомогенизировали. Измерение ОП

образцов проводили на спектрофотометре Multiskan FC (Thermo Scientific Instruments Co, Ltd (Китай) при длине волны 530 нм. Всего проанализировано от 9 до 17 образцов в каждой опытной и контрольной группах.

Активность каталазы (CAT) оценивали по изменению ОП образцов, подготовленных из 10-суточных животных по вышеописанной схеме, на спектрофотометре ThermoScientific™ NanoDrop™ 2000/2000c Spectrophotometers при длине волны 237 нм по модифицированной методике [20]. В каждой группе проанализировано от 12 до 43 образцов с 20 особями в каждом. Объем измеряемой пробы составлял 2 мкл. Полученное значение ОП в усл. ед. пересчитывается в единицы активности фермента CAT по формуле (2):

$$A(\text{cat}) = (E(\text{опыт}) - E(\text{хол})) \times K \times V(\text{гом})/t \times V(\text{общ}), \quad (2)$$

где $A(\text{cat})$ – активность CAT в $\text{M}^{-1}/\text{мин} \times \text{г}$ (мл); $E(\text{хол})$ – ОП холостой пробы (без добавления исследуемого образца); $E(\text{опыт})$ – ОП опытной пробы; $V(\text{гом})$ – объем исходного гомогената; $V(\text{общ})$ – объем внесенной пробы; t – время инкубации, мин; K – коэффициент молярной экстинкции перекиси водорода [21].

Активность супероксиддисмутазы (SOD) оценивали по модифицированной методике [22]. Измерение ОП образцов, подготовленных из 10-суточных животных по вышеописанной схеме, проводили на спектрофотометре Multiskan FC (Thermo Scientific Instruments Co, Ltd (Китай) при длине волны 570 нм. В каждом образце было по 20 особей. Всего проанализировано от 19 до 47 образцов из каждой опытной и контрольной группы.

Активность пероксидазы (PX) оценивали по модифицированной методике [20]. Измерение ОП образцов, подготовленных из 10-суточных животных по вышеописанной схеме, проводили на иммуноферментном анализаторе «Stat Fax 280» («Awareness Technology», США, VIS-модель) при длине волны 450 нм (рабочая) и 630 нм (шумовая). В каждом образце было 20 особей. Всего проанализировано от 16 до 36 образцов из каждой опытной и контрольной группы.

Статистический анализ

Анализ динамики выживаемости проводили лог-ранк тестом. Для анализа цитотоксичности, антиоксидантных и радиопротекторных свойств фумарата использовали непараметрический критерий Краскела-Уоллиса для нескольких групп сравнения и Манна-Уитни с поправкой на множественное сравнение в программе STATISTICA 8.

Результаты

Анализ выживаемости *D. magna*

На рисунке представлена динамика выживаемости *D. magna* в 21-суточном эксперименте в контроле и после облучения пучками протонов, а также при взаимодействии облучения с фумаратом 3-ГП.

Согласно полученным данным, выживаемость облученных в дозе 30 Гр *D. magna* к 21-суточному возрасту снижалась на 29,3 % ($p=0,03$). Фумарат не изменял выживаемость животных. При совместном с облучением протонами действии фумарата выживаемость *D. magna* к 21-суточному возрасту снижалась на 44,4 % ($p=8,8 \times 10^{-4}$).

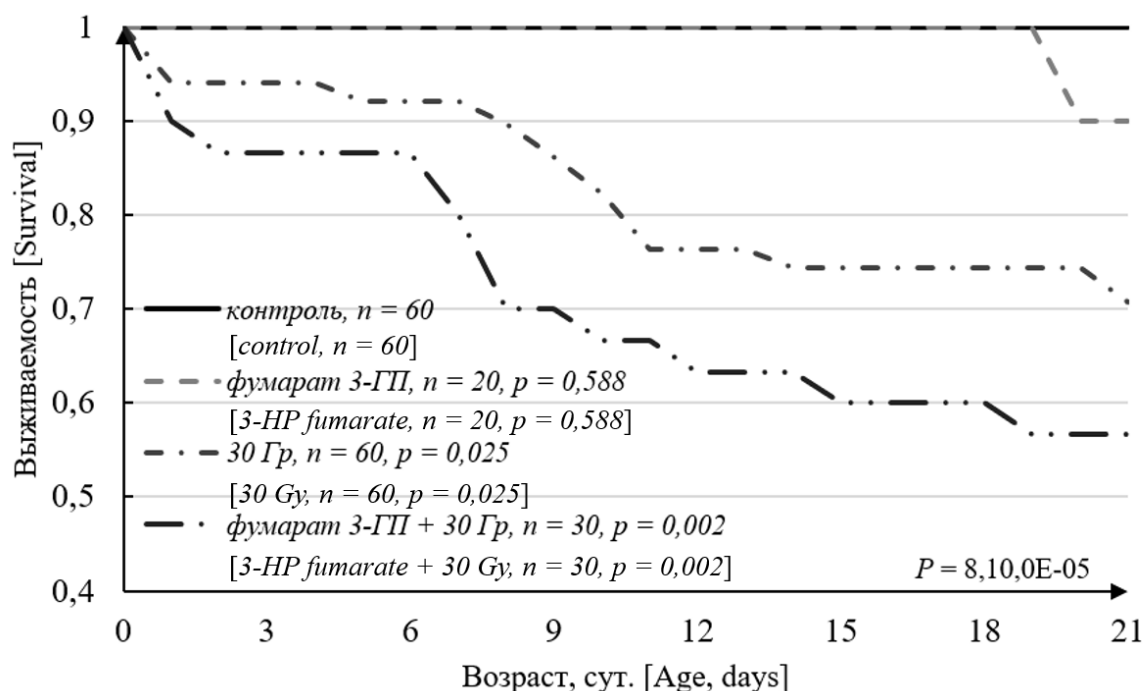


Рис. Доля выживших *Daphnia magna* в контроле и после облучения пучками протонов в дозе 30 Гр, а также при взаимодействии облучения с фумаратом 3-ГП. На графиках показаны вероятности (p) по всей выборке и (n) – количество животных в выборке

[Fig. The proportion of *Daphnia magna* survivors in the control group and after irradiation with proton beams at a dose of 30 Gy, as well as during the interaction of irradiation with 3-HP fumarate. The graphs show the probabilities (p) for the entire sample and (n) - number of animals in the sample]

В таблице 1 представлены результаты оценки вклада облучения, фумарата 3-ГП и их взаимодействия в изменение выживаемости *D. magna* к 21-суточному возрасту.

Вклад облучения, фумарата 3-ГП и их взаимодействия в наблюдаемые эффекты выживаемости *D. magna*
[Table 1
The contribution of irradiation, 3-HP fumarate and their interactions to the observed effects of *D. magna* survival]

Фактор [Factor]	P^* Выживаемость [Survival]
30 Гр + Фумарат 3-ГП [30 Gy + 3-HP Fumarate]	0,002**
30 Гр [30 Gy]	0,012
Фумарат 3-ГП [3-HP Fumarate]	0,699

* – по критерию Манна-Уитни с поправкой на множественное сравнение, ** – тест Краскела-Уоллиса с поправкой на множественное сравнение [* – Mann-Whitney test with multiple comparison correction, ** - Kruskal-Wallis test with multiple comparison correction]

Из таблицы 1 видно, что сочетанное действие облучения с фумаратом вызывало усиление эффекта с учетом поправки на множественное сравнение ($p=0,002$). Согласно тесту Краскела-Уоллиса, основной вклад в эффект вносило облучение.

Анализ цитотоксического действия факторов по МТТ- и МДА-показателям

Анализ вклада действующих факторов в изменение МТТ- и МДА-показателей в клетках *D. magna* выявил цитотоксический эффект облучения протонами ($p=2,12 \times 10^{-5}$ и 0,002 соответственно) (табл. 2).

Медианные значения (M) приведены в единицах оптической плотности (ОП). Попарное сравнение с контролем проведено по критерию Манна-Уитни с поправкой на множественное сравнение. Согласно представленным в таблице 2 данным, облучение вызывало значимое снижение МТТ- и МДА-показателей ($p=2,12 \times 10^{-5}$ и 0,002). Фумарат не изменял анализируемые показатели ($p \sim 1,000$ для МТТ- и МДА-показателей) и не проявлял радиопротекторные свойства при совместном с облучением протонами воздействии на тест-организм ($p=0,018$ и $p=0,006$ для МТТ- и МДА-показателей соответственно).

Анализ вклада действующих факторов в изменение активности ферментов каталазы (*CAT*), пероксидазы (*Px*) и супероксиддисмутазы (*SOD*) в гомогенизированных образцах *D. magna* показан в таблице 3.

Таблица 2

Влияние облучения протонами и фумарата 3-ГП в изменение МТТ- и МДА-показателей в клетках *Daphnia magna*

[Table 2]

The effect of proton irradiation and 3-HP fumarate on changes in MTT- and MDA-parameters in *Daphnia magna* cells

Фактор [Factor]	Количество образцов ⁺⁺ [Sample Size ⁺⁺]	Медиана (мр)*, усл. ед. [Median (IQR)*, Conditional units (CU)]	<i>P</i> ^{**}	<i>P</i> ^{***}	<i>P</i> ^{****}
МТТ-показатель [MTT-indicator]					
Контроль, К [Control, C]	29	0,367 (0,362)	–	–	–
Облучение, 30 Гр [Radiation, 30 Gy]	47	0,227 (0,088)	5,30 x10 ^{-6*}	2,12 x10 ^{-5*}	3x10 ^{-5*}
Фумарат 3-ГП, 0,05 мг/мл [3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	25	0,401 (0,046)	0,591	1,000	0,917
30 Гр + фумарат 3-ГП [30 Gy + 3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	19	0,235 (0,027)	4,57 x10 ^{-4*}	0,018*	0,026*
МДА-показатель [MDA-indicator]					
Контроль, К [Control, C]	17	0,582 (0,089)	–	–	–
Облучение, 30 Гр [Radiation, 30 Gy]	14	1,251 (0,113)	4,78x10 ^{-5*}	0,002*	0,001*
Фумарат 3-ГП, 0,05 мг/мл [3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	12	0,511 (0,074)	0,658	1,000	0,981
30 Гр + фумарат 3-ГП [30 Gy + 3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	9	1,065 (0,127)	1,62x10 ^{-4*}	0,006*	0,006*

* – межквартильный размах; ** – тест Манна-Уитни; *** – поправка на множественное сравнение; **** – тест Краскела-Уоллиса; ++ – в каждом образце по 20 особей; * – значимые отличия от соответствующего контроля [* – interquartile range; ** – Mann-Whitney test; *** – multiple comparison correction; **** – Kruskal-Wallis test; ++ – each sample contains 20 individuals; * – statistically significant differences from the corresponding control].

Таблица 3

Влияние облучения протонами и действие фумарата 3-ГП на активность ферментов антиоксидантной защиты в клетках *Daphnia magna*

[Table 3]

The effect of proton irradiation and 3-HP fumarate on the activity of antioxidant enzymes in *Daphnia magna* cells

Фактор [Factor]	Количество образцов ⁺⁺ [Sample Size ⁺⁺]	Медиана (мр)*, усл. ед. [Median (IQR)*, Conditional units (CU)]	<i>P</i> ^{**}	<i>P</i> ^{***}	<i>P</i> ^{****}
Активность каталазы (CAT) [Catalase activity (CAT)]					
Контроль, К [Control, C]	43	0,036 (0,001)	–	–	–
Облучение, 30 Гр [Radiation, 30 Gy]	25	0,047 (0,001)	4,2x10 ^{-5*}	0,001*	0,021*
Фумарат 3-ГП, 0,05 мг/мл [3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	27	0,032 (0,003)	0,774	1,000	0,976
30 Гр + фумарат 3-ГП [30 Gy + 3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	12	0,049 (0,002)	1,3x10 ^{-4*}	0,005*	0,024*
Активность пероксидазы (Px) [Peroxidase activity (Px)]					
Контроль, К [Control, C]	45	0,187 (0,006)	–	–	–
Облучение, 30 Гр [Radiation, 30 Gy]	43	0,113 (0,004)	10 ^{-7*}	2,27x10 ^{-7*}	0,011*
Фумарат 3-ГП, 0,05 мг/мл [3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	41	0,156 (0,007)	0,332	1,000	0,998
30 Гр + фумарат 3-ГП [30 Gy + 3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	23	0,104 (0,003)	10 ^{-7*}	1,25x10 ^{-7*}	0,042*

Фактор [Factor]	Количество образцов ⁺⁺ [Sample Size ⁺⁺]	Медиана (мр) [*] , усл. ед. [Median (IQR) [*] , Conditional units (CU)]	<i>P</i> ^{**}	<i>P</i> ^{***}	<i>P</i> ^{****}
<i>Активность супероксиддисмутазы (SOD) [Superoxide dismutase activity (SOD)]</i>					
Контроль, К [Control, C]	36	0,187 (0,007)	–	–	–
Облучение, 30 Гр [Radiation, 30 Gy]	36	0,113 (0,04)	10 ^{-7*}	4,00x10 ^{-7*}	10 ^{-5*}
Фумарат 3-ГП, 0,05 мг/мл [3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	31	0,157 (0,007)	0,282	1,000	0,674
30 Гр + фумарат 3-ГП [30 Gy + 3-HP fumarate, 0.05 mg/mL]	19	0,104 (0,005)	10 ^{-7*}	4,00x10 ^{-7*}	10 ^{-5*}

* – межквартильный размах; ** – тест Манна-Уитни; *** – поправка на множественное сравнение; **** – тест Краскела-Уоллиса; ++ – в каждом образце по 20 особей. * – значимые отличия от соответствующего контроля [* – interquartile range; ** – Mann-Whitney test; *** – multiple comparison correction; **** – Kruskal-Wallis test; ++ – each sample contains 20 individuals; * – statistically significant differences from the corresponding control].

Из таблицы 3 видно, что облучение вызывает значимый цитотоксический эффект ($p=0,001$; $2,27 \times 10^{-7}$, $4,0 \times 10^{-7}$ для *CAT*, *Px* и *SOD* соответственно). Совместное действие облучения и фумарата 3-ГП, проанализированное тестом Манна-Уитни, оказывало аналогичное воздействие на животных ($p=0,005$; $1,25 \times 10^{-7}$ и $4,00 \times 10^{-7}$ соответственно для *CAT*, *Px* и *SOD*). Из таблицы 3 видно, что облучение вносило основной вклад в цитотоксический эффект, оцененный тестом Краскела-Уоллиса с поправкой на множественное сравнение.

Обсуждение

Данные по негативному действию облучения протонами согласуются с результатами исследований на животных и клеточных линиях. На эмбрионах рыбок *Danio rerio* обнаружено снижение выживаемости, повышение частоты искривления позвоночника как одного из видов аномалий развития и отека перикарда как примера острого воздействия протонного излучения в дозе выше 15 Гр [23]. Облучение пучками протонов в распределенном пике Брега в дозе 10 Гр вызывало апоптоз в клеточных линиях человека (LLC, HepG2) в опытах *in vitro* [24]. Фумарат 3-ГП в дозе 25 и 50 мг/кг проявлял антиоксидантные свойства на модели острой интоксикации тетрахлорметаном, проявляющееся в снижении летальности подопытных крыс [8].

Наши данные не подтверждают протекторные свойства фумарата 3-ГП, описанные в цитируемом исследовании [25], где показано, что применение фумарата перорально в концентрации 25 мг/кг в 1,4 раза повышало выживаемость подопытных крыс. Радиопротекторный эффект фумарата 3-ГП (0,01 мг/мл) был описан в литературе после облучения мезенхимальных стволовых клеток (МСК) и опухолевых клеток линии HeLa гамма-квантами в дозе 10 Гр (энергия 1,25 МэВ). Однако добавление фумарата 3-ГП перед облучением клеточных линий ионами ¹²C в дозах 10 Гр не оказывало радиозащитного действия, а приводило к снижению в 1,3 раза времени удвоения опухолевых (нейробластома SK-N-BE) клеток человека [16]. Авторы объясняли наблюдаемый эффект высокой ОБЭ ионного излучения.

Из литературы известно, что фумарат 3-ГП (в дозе 25 мг/кг) эффективно снижал выраженность процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) по уровню МДА в сыворотке крови белых крыс с острым тетрахлорметановым гепатитом [26]. Из литературы также известно о повышении ка-

лазной активности клеток, ответственных за сахарный диабет у белых мышей, при пероральном введении фумарата 3-ГП [27]. Мексидол (3-окси-6-метил-2-этилпиридина-сукцинат), является аналогом фумарата 3-ГП, и как многие 3-оксипиридины, обладает ингибирующим действием на процессы ПОЛ, в частности, повышает активность *SOD*, что приводит к восстановлению тканевого дыхания на внутренней мембране митохондрий [28]. Однако, полученные нами данными не выявили изменения активности каталазы и других анализируемых ферментов антиоксидантной защиты в клетках *D. magna* при культивировании животных в растворе фумарата 3-ГП с концентрацией 0,05 мг/мл ($p \sim 1,000$ для *CAT*, *Px* и *SOD*) после облучения протонами.

В патенте на способ синтеза фумарата 3-ГП описано эффективное применение данного вещества для лечения заболеваний, обусловленных окислительным стрессом [13]. Аналогами фумарат 3-ГП являются производные 3-оксипиридина, такие как мексидол и эмоксипин, широко применяемые в медицине благодаря антиоксидантным, анксиолитическим, противосудорожным, антистрессорным, церебропротекторным, противопаркинсоническим, антиамнестическим и противопохмельным свойствам [29].

Используемый нами тест-организм *D. magna* наиболее чувствителен к негативным факторам в ювенильный период [30]. Применение данного тест-организма в качестве модели позволило выявить усиление цитотоксического действия облучения протонами при суточном воздействии на новорожденных животных наночастицами золота в концентрации 10 мкг/мл [31]. Однако проведенное нами исследование не выявило антиоксидантных и радиопротекторных свойств фумарата 3-ГП после *in vivo* облучения протонами односточных модельных животными *D. magna* в дозе 30 Гр (мощность 150 МэВ).

Согласно сведениям из литературы, фумарат 3-ГП проявил себя как радиопротектор после облучения клеточных линий человека гамма-квантами ⁶⁰Co, но не проявил радиозащитных свойств после облучения тяжелыми ионами ¹²C [16, 26]. Возможно, феномен связан с особенностями взаимодействия фумарата 3-ГП с разного типа ионизирующим излучением. При исследовании радиозащитных свойств радиопротекторов (например, мелатонина [32]) обнаруживают противоречивые результаты ввиду наличия прооксидантного эффекта, приводящего к радиосенсибилизации клеток. Прямой эффект радиопротекторных свойств мелатонина объяс-

няют за счет удаления свободных радикалов, а косвенный антиоксидантный эффект – результатом изменений в транскрипции генов и активности антиоксидантных ферментов, продуцирующих АФК и оксиды азота. Авторы статьи [32] считают, что одним из факторов, при котором радиопротекторы могут как уменьшать, так и усиливать повреждения клеток, является мощность дозы ионизирующего излучения. Исследование радиопротекторных и антиоксидантных свойств фумарата 3-ГП при взаимодействии с плотно-ионизирующим излучением требует дальнейшего анализа.

Заключение

В результате проведенного исследования было выявлено, что фумарат 3-гидроксипиридина не обладает выраженными радиопротекторными и антиоксидантными свойствами при облучении модельного тест-организма *Daphnia magna* пучками протонов в дозе 30 Гр.

Научно-практическая значимость работы заключается в уточнении спектра действия фумарата 3-ГП к излучениям с высокой линейной передачей энергии (ЛПЭ) и его потенциального применения в медицине. Учитывая, что соединение проявляет антиоксидантные и кардиопротекторные свойства при различных патологических состояниях после облучения гамма-квантами, дальнейшие исследования могут быть направлены на поиск оптимальных условий его использования в клинической практике, а также на поиск новых классов радиопротекторов для протонной терапии.

В ходе работы удалось подтвердить негативное влияние протонного излучения на модельный организм, что подтверждается снижением выживаемости и изменением ключевых показателей окислительного стресса и метаболической активности. Полученные результаты вносят вклад в понимание биологических эффектов протонного облучения и подчеркивают необходимость поиска эффективных средств защиты живых систем от его последствий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кузьмичева О.В. – анализ научной литературы, получение экспериментальных данных, получение и статистический анализ данных, обсуждение результатов и оформление окончательного варианта статьи для подачи в редакцию.

Ускалова Д.В. – планирование и организация экспериментальной работы, определение цели и задач исследования, получение и статистический анализ данных, обсуждение результатов и написание статьи.

Дегтярева Д.Т. – получение экспериментальных данных, анализ и обсуждение полученных результатов.

Уланова Т.В. – анализ научной литературы и интерпретация результатов.

Шкавров С.В. – синтез фумарата, анализ литературы и интерпретация результатов.

Сарапульцева Е.И. – разработка концепции научной работы и осуществление общего руководства, анализ и интерпретация полученных данных, обсуждение результатов и написание статьи.

Благодарности

Облучение осуществлено на оборудовании ЦКП «Радиологические и клеточные технологии» ФГБУ «НМИЦ радиология» Минздрава России.

Информация о конфликте интересов

Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФН в рамках научного проекта № 23-24-10041.

Литература

1. Козина Ю.В., Зуков Р.А., Слепов Е.В., Козина Е.В. Роль радиопротекторов и иммунотропов в профилактике лучевых реакций и осложнений // Эффективная фармакотерапия. 2021. Т. 17, № 2. С. 50–57. DOI: 10.33978/2307-3586-2021-17-2-50-57.
2. Воронина Т.А. Антиоксидант мексидол. Основные нейropsychотропные эффекты и механизм действия // Психофармакология и биологическая наркология. 2001. № 1. С. 2–12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antioksidant-meksidol-osnovnye-neyropsihotropnye-effekty-i-mehanizm-deystviya> (Дата обращения: 02.11.2024).
3. Торшин И.Ю., Громова О.А., Сардарян И.С., Федотова Л.Э. Сравнительный хемореактивный анализ мексидола // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2017. Т. 117, № 1. С. 75–83. DOI: 10.17116/jnevro20171171275-84.
4. Клебанов Г.И., Любичкий О.Б., Васильева О.В. и др. Антиоксидантные свойства производных 3-оксипиридина: мексидола, эмоксипина и проксипина // Вопросы медицинской химии. 2001. Т. 47, № 3. С. 288–300. URL: <http://pbmc.ibmc.msk.ru/ru/article-ru/PBMC-2001-47-3-288/> (Дата обращения: 02.11.2024).
5. Замотаева М.Н., Чаиркин И.Н., Инчина В.И., Дроздов И.А. Экспериментальное обоснование применения мексидола и 3-оксипиридина фумарата при хроническом повреждении миокарда // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2013. Т. 155, № 2. С. 212–214.
6. Ilica R.A., Kloetzer L., Galaction A.I., Cașcaval D. Fumaric acid: production and separation // Biotechnology letters. 2019. Vol. 41, No 1 P.47–57. DOI:10.1007/s10529-018-2628-y.
7. Volc-Platzter B. Fumaric acid esters for paediatric psoriasis // The British journal of dermatology. 2021. Vol. 185, No 1, P. 5–6. DOI: 10.1111/bjd.20057.
8. Данилина Е.В., Семенов А.В. Синтез и исследование фармакологической активности нового экспериментального препарата-фумарата 3-оксипиридина // Вестник Российского государственного медицинского университета. 2006. Т. 49, № 2. С. 359–362. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hukkwf> (Дата обращения: 02.11.2024).
9. Инчина В.И., Коршунова А.Б., Просвиркина И.А. и др. Сравнительная оценка некоторых эффектов производных 3-оксипиридина и пиримидина в эксперименте // Вестник новых медицинских технологий. 2010. Т. 17, № 3. С. 158–160. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-otsenka-nekotoryh-effektov-proizvodnyh-z-oksipiridina-i-pirimidina-v-eksperimente> (Дата обращения: 02.11.2024).
10. Коршунова А.Б., Инчина В.И., Костычев Н.А. и др. Нейропротективная активность некоторых производных 3-оксипиридина и пиримидина при глобальной ишемии головного мозга в эксперименте // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2011. Т. 2, № 18. С. 41–47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyroprotektivnaya-aktivnost-nekotoryh-proizvodnyh-3-oksipiridina-i-pirimidina-pri-globalnoy-ishemii-golovnogo-mozga-v-eksperimente> (Дата обращения: 02.11.2024).
11. Семенова Е.В., Инчина В.И., Семенов А.В. Изучение антигипоксической активности новых производных 3-гидроксипиридина // Журнал российской ассоциации по спортивной медицине и реабилитации больных и инвалидов. 2007. Т. 22, № 2. С. 52–55.

12. Трескунова Е.В., Свиридонова С.В. Исследование производного 3-оксипиридина на белковообразовательные, пигментные, липидные и ферментные показатели печени // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. Т. 5(107). DOI: 10.23670/IRJ.2021.107.5.056.
13. OECD, 2012. Test No. 211: *Daphnia magna* Reproduction Test, OECD Guidelines for the Testing of 510 Chemicals, Section 2 (OECD Publishing, Paris). URL: https://www.oecd.org/en/publications/test-no-211-daphnia-magna-reproduction-test_9789264185203-en.html (Дата обращения: 02.11.2024).
14. Семенов А.В., Инчина В.И., Семенова Е.В. Патент РФ RU 2365582 С1. МПК C07D213/65 (2006.01). Соль 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина с фумаровой кислотой, обладающая метаболической и кардиопротекторной активностью, и способ ее получения. Оpubл. 27.08.2009.
15. Бушманов А.Ю., Шейно И.Н., Липенгольц А.А. и др. Перспективы применения комбинированных технологий в протонной терапии злокачественных новообразований // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, № 3. С. 11–18. DOI: 10.12737/article_5cf237bf846b67.57514871.
16. Купцова П.С., Комарова Л.Н., Выпова Е.Р. Исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии ионизирующего излучения на клетки человека // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 32–39. DOI:10.21514/1998-426X-2023-16-1-32-39.
17. Cancer Cell Culture. Methods and Protocols. / Ed. I.A. Cree. Second ed. – Springer New York Dordrecht Heidelberg London: Human Press, 2011. P. 237–244.
18. Савина Н.Б., Ускалова Д.В., Сарапульцева Е.И. Использование МТТ-теста для изучения отдаленных эффектов острого γ -облучения у ракообразных *Daphniamagna* // Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 1. С. 86–93. DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-1-86-93
19. Barata C., Varo I., Navarro J.C. et al. Antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in the freshwater cladoceran *Daphnia magna* exposed to redox cycling compounds // Comparative Biochemistry and Physiology C Toxicology & Pharmacology. 2005. Vol. 140, No 2. P. 175–186. DOI: 10.1016/j.cca.2005.01.013/
20. Jemec A., Tišler T., Erjavec B., Pintar A. Antioxidant responses and whole-organism changes in *Daphnia magna* acutely and chronically exposed to endocrine disruptor bisphenol A // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2012. No 86. P. 213–218. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.09.016/
21. Aebi H. Catalase in vitro // Methods in Enzymology. 1984. No 105. P. 121–126. DOI: 10.1016/S0076-6879(84)05016-3.
22. Сирота Т.В. Использование нитросинеготетразолия в реакции автоокисления адреналина для определения активности супероксиддисмутазы // Биомедицинская химия. 2013. Т. 59, № 4. С. 399–410. DOI: 10.18097/PBMC20135904399.
23. Szabó E.R., Brand M., Hans S. et al. Radiobiological effects and proton RBE determined by wildtype zebrafish embryos // PLoS ONE. 2018. Vol. 13, No 11. P. e0206879. DOI: 10.1371/journal.pone.0206879.
24. Lee K.B., Lee J.S., Park J.W. et al. Low energy proton beam induces tumor cell apoptosis through reactive oxygen species and activation of caspases. *Experimental & molecular medicine*. 2008. Vol. 40. P. 118–29. DOI: 10.3858/emm.2008.40.1.118.
25. Уланова Т.В., Инчина В.И., Русейкин Н.С. и др. Исследование влияния новых производных 3-гидроксипиридина и препаратов сравнения на выживаемость и некоторые биохимические показатели крови белых крыс при экспериментальном диабете // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26. № 2. С. 180–191. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201602.180-191.
26. Уланова Т.В., Котляров А.А., Комарова Л.Н. и др. Изучение противоопухолевой активности фумарата 3-оксипиридина на культурах клеток // Современные проблемы науки и образования. 2022. № 6–10. DOI: 10.17513/spno.32253.
27. Усанова А.А., Семенова Е.В., Инчина В.И. и др. Влияние производных 3-гидроксипиридина на состояние процессов перекисного окисления липидов при экспериментальном остром тетрахлорметановом гепатите // Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. 2009. Т. 19, № 1. С. 114–118.
28. Шахмарданова С.А., Гулевская О.Н., Хананашвили Я.А. и др. Препараты янтарной и фумаровой кислот как средства профилактики и терапии различных заболеваний // Журнал фундаментальной медицины и биологии. 2016. № 3. С. 16–30. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preparaty-yantarnoy-i-fumarovoy-kislot-kak-sredstva-profilaktiki-i-terapii-razlichnyh-zabolevaniy> (Дата обращения: 02.11.2024).
29. Новиков В.Е., Ковалева Л.А., Лосенкова С.О., Климкина Е.И. Фармакология антиоксидантов на основе 3-оксипиридина // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2004. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/farmakologiya-antioksidantov-na-osnove-3-oksipiridina> (Дата обращения: 02.11.2024).
30. Harris K.D.M., Bartlett N.J., Lloyd V.K. *Daphnia* as an emerging epigenetic model organism // *Genetics research international*. 2012. No 1. P. 147892. DOI: 10.1155/2012/147892.
31. Петросова Д.Т., Ускалова Д.В., Кузьмичева О.В. и др. Усиление наночастицами золота цитотоксического действия облучения протонами в опытах *in vivo* // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69, № 4. С. 13–19. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-4-13-19.
32. Третьякова М.С., Белоусов М.В., Плотников Е.В. Радиопротекция и радиосенсибилизация: современный взгляд на радиомодуляторы в фармакологии // Современные проблемы науки и образования. 2022. № 6–2. DOI:10.17513/spno.32262.

Поступила: 03.12.2024

Кузьмичева Ольга Владимировна – магистрант Обнинского института атомной энергетики – филиала Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института, программа «Биоинформатика и анализ данных в биологии и медицине». Адрес для переписки: 249039, Россия, Калужская область, г. Обнинск, ул. Студгородок, д. 1; E-mail: kuzmichevaov20@oiate.ru
ORCID: 0009-0002-3344-0099

Ускалова Дарья Вадимовна – кандидат биологических наук, доцент отделения биотехнологий Обнинского института атомной энергетики – филиала Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института, Обнинск, Россия
ORCID: 0000-0001-8687-0872

Дегтярева Диана Тиграновна – магистрант Обнинского института атомной энергетики – филиала Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института, программа «Биомедицинские исследования в радиобиологии» Обнинск, Россия

ORCID: 0009-0003-4600-1527

Уланова Татьяна Вадимовна – кандидат медицинских наук, заведующая кафедрой фармакологии Обнинского института атомной энергетики – филиала Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института, Обнинск, Россия

ORCID: 0000-0002-1371-4358

Шкавров Сергей Владимирович – кандидат химических наук, доцент отделения биотехнологий Обнинского института атомной энергетики – филиала Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института, Обнинск, Россия

ORCID: 0009-0009-0572-9427

Сарапульцева Елена Игоревна – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры фундаментальной медицины Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института, Москва, Россия

ORCID: 0000-0003-4747-5495

Для цитирования: Кузьмичева О.В., Ускалова Д.В., Дегтярева Д.Т., Уланова Т.В., Шкавров С.В., Сарапульцева Е.И. Анализ радиопротекторных свойств фумарата 3-гидроксипиридина на модели беспозвоночного животного после облучения протонами в опытах *in vivo* // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 27–37. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-27-37

Analysis of the radioprotective properties of 3-hydroxypyridine fumarate on an invertebrate animal model after proton irradiation *in vivo*

Olga V. Kuzmicheva¹, Daria V. Uskalova¹, Diana T. Degtyareva¹, Tatyana V. Ulanova¹, Sergey V. Shkavrov¹, Elena I. Sarapultseva²

¹ Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Branch of National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Obninsk, Kaluga region, Russia

² Moscow Engineering Physics Institute National Research Nuclear University, Moscow, Russia

The purpose of the article is to analyze the radio protective and antioxidant properties of 3-hydroxypyridine fumarate in interaction with proton irradiation on a model test organism from the suborder *Daphnia magna* crustaceans *in vivo*. The salt of 3-hydroxypyridine fumarate synthesized by the authors was a white crystalline substance soluble in alcohol and water – a mixture of 2-ethyl-6-methyl-3-hydroxypyridine and fumaric acid in ethanol. Acute irradiation of the test organism was carried out on the Prometheus proton complex at the A. Tsyb Medical Radiological Research Center (Obninsk, Russia) with a scanning proton beam at a dose of 30 Gy (energy 150 MeV) in a distributed Bragg peak. The survival rate of *D. magna* was assessed in a 21-day experiment on a daily basis. The cytotoxicity of the studied factors was analyzed by changes in MTT and MDA parameters, the antioxidant properties of 3-hydroxypyridine fumarate were evaluated by changes in the activity of catalase, peroxidase and superoxide dismutase enzymes. The contribution of the analyzed factors to the observed effects was assessed using the Kruskal-Wallis test. Statistical processing of survival was carried out according to the χ^2 criterion, and other indicators – according to the Mann-Whitney criterion, adjusted for multiple comparisons. According to the data obtained, the survival rate of irradiated newborn animals decreased by 29.3 % by the age of 21 days ($p = 0.03$). When combined with 3-hydroxypyridine fumarate action, the death of animals decreased to 44.4 % ($p = 8.8 \times 10^{-4}$). It was revealed that radiation contributed to the joint effect. An integral assessment of the level of oxidative stress showed that proton irradiation causes a cytotoxic effect in the cells of the test organism. 3-hydroxypyridine fumarate does not have radioprotective and antioxidant effects when *D. magna* is cultured in a solution of a substance with a concentration of 0.05 micrograms/ml after proton irradiation. The results obtained are consistent with the data on the absence of radioprotective properties of 3-hydroxypyridine fumarate after irradiation with heavy ions. The authors propose a unified mechanism of interaction between 3-hydroxypyridine fumarate and densely ionizing radiation of various types (protons, heavy ions, alpha particles), which does not exhibit radioprotective effects. It is necessary to continue the search for radioprotectors for proton therapy among substances of a different class.

Key words: proton irradiation, *Daphnia magna*, radioprotector, antioxidant, 3-hydroxypyridine fumarate.

Olga V. Kuzmicheva

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering

Address for correspondence: Studgorodok Str., 1, Obninsk, Kaluga region, 249030, Russia; E-mail: kuzmichevaov20@oiate.ru

Authors' personal contribution

Kuzmicheva O.V. – analysis of scientific literature, acquisition of experimental data, data collection and statistical analysis, discussion of results, and preparation of the final version of the article for submission.

Uskalova D.V. – planning and organization of experimental work, defining the research objectives and tasks, data acquisition and statistical analysis, discussion of results, and article writing.

Degtyareva D.T. – acquisition of experimental data, analysis, and discussion of the obtained results.

Ulanova T.V. – analysis of scientific literature and interpretation of results.

Shkavrov S.V. – synthesis of fumarate, literature analysis, and interpretation of results.

Sarapultseva E.I. – development of the scientific concept and overall supervision, analysis and interpretation of the obtained data, discussion of results, and article writing.

Acknowledgments

The irradiation was carried out using the equipment of the Shared Research Facility "Radiological and Cellular Technologies" at the National Medical Research Center of Radiology of the Ministry of Health of Russia.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

This work was financially supported by the Russian Science Foundation under the scientific project No. 23-24-10041.

References

- Kozina YuV, Zukov RA, Slepov EV, Kozina EV. The role of radioprotectors and immunotropes in the prevention of radiation reactions and complications. *Effektivnaya farmakoterapiya = Effective Pharmacotherapy*. 2021;17(2): 50-57. DOI: 10.33978/2307-3586-2021-17-2-50-57. (In Russian).
- Voronina TA. Antioxidant Mexidol: Main neuropsychotropic effects and mechanism of action. *Psikhofarmakologiya i biologicheskaya narkologiya = Psychopharmacology and Biological Narcology*. 2001;1: 2–12. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/antioksidant-mexidol-osnovnye-neyropsihotropnye-effekty-i-mehanizm-deystviya> [Accessed November 02, 2024]. (In Russian).
- Torshin IYu, Gromova OA, Sardaryan IS, Fedotova LE. Comparative chemoreactomic analysis of Mexidol. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. SS Korsakova = Journal of Neurology and Psychiatry named after SS Korsakov*. 2017;117(1): 75–83. DOI: 10.17116/jnevro20171171275-84. (In Russian).
- Klebanov GI, Lyubitskiy OB, Vasileva OV, Klimov YuV, Penzulaeva OB, Teplyashin AS, et al. Antioxidant properties of 3-hydroxypyridine derivatives: Mexidol, Emoxipin, and Proxipin. *Voprosy meditsinskoy khimii = Problems of Medical Chemistry*. 2001;47(3): 288–300. Available from: <http://pbmc.ibmc.msk.ru/ru/article-ru/PBMC-2001-47-3-288/> [Accessed November 02, 2024]. (In Russian).
- Zamotaeva MN, Chairkin IN, Inchina VI, Drozdov IA. Experimental substantiation for the use of Mexidol and 3-hydroxypyridine fumarate in chronic myocardial injury. *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2013;155(2): 212-214. DOI:10.1007/s10517-013-2115-3.
- Ilica RA, Kloetzer L, Galaction AI, Cascaval D. Fumaric acid: production and separation. *Biotechnology letters*. 2019;41(1): 47–57. DOI:10.1007/s10529-018-2628-y.
- Volc-Platzer B. Fumaric acid esters for paediatric psoriasis. *The British journal of dermatology*. 2021;185(1): 5–6. DOI: 10.1111/bjd.20057.
- Danilina EV, Semenov AV. Synthesis and pharmacological activity study of a new experimental drug – 3-hydroxypyridine fumarate. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Russian State Medical University*. 2006;49(2): 359–362. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hukkwf> [Accessed November 02, 2024]. (In Russian).
- Inchina VI, Korshunova AB, Prosvirkina IA, Semenov AV, Ulanova TV, Chairkin IN. Comparative evaluation of some effects of 3-hydroxypyridine and pyrimidine derivatives in an experiment. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy = Bulletin of New Medical Technologies*. 2010;17(3): 158–160. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitel'naya-otsenka-nekotoryh-effektov-proizvodnyh-z-oksipiridina-i-pirimidina-v-eksperimente> [Accessed November 02, 2024]. (In Russian).
- Korshunova AB, Inchina VI, Kostychev NA, Prosvirkina IA, Chairkin IN. Neuroprotective activity of some 3-hydroxypyridine and pyrimidine derivatives in global cerebral ischemia in an experiment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region = Izvestia of Higher Educational Institutions. Volga Region*. 2011;2(18): 41–47. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyroprotektivnaya-aktivnost-nekotoryh-proizvodnyh-3-oksipiridina-i-pirimidina-pri-globalnoy-ishemii-golovnogo-mozga-v-eksperimente> [Accessed November 02, 2024]. (In Russian).
- Semenova EV, Inchina VI, Semenov AV. Study of antihypoxic activity of new 3-hydroxypyridine derivatives. *Zhurnal rossiyskoy assotsiatsii po sportivnoy meditsine i reabilitatsii bol'nykh i invalidov = Journal of the Russian Association for Sports Medicine and Rehabilitation of Patients and Disabled Persons*. 2007;22(2): 52-55. (In Russian).
- Treskunova EV, Sviridonova SV. Study of a 3-oxypyridine derivative on protein formation, pigment, lipid, and enzyme indicators of the liver. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*. 2021;5(107). DOI: 10.23670/IRJ.2021.107.5.056. (In Russian).
- OECD. 2012. Test No. 211: Daphnia magna Reproduction Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2 (OECD Publishing, Paris). Available from: https://www.oecd.org/en/publications/test-no-211-daphnia-magna-reproduction-test_9789264185203-en.html [Accessed November 02, 2024].
- Semenov AV, Inchina VI, Semenova EV. Patent RU 2365582 C1. IPC C07D213/65 (2006.01). Salt of 2-ethyl-6-methyl-3-hydroxypyridine with fumaric acid possessing metabolic and cardioprotective activity and a method for its production. Published on august 27th, 2009. (In Russian).
- Bushmanov AYU, Sheyno IN, Lipengolts AA, Soloviev AN, Koryakin SN. Prospects for the application of combined technologies in proton therapy of malignant neoplasms. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2019;64(3): 11–18. DOI: 10.12737/article_5cf237bf846b67.57514871. (In Russian).
- Kuptsova PS, Komarova LN, Vypova ER. Study of radioprotective properties of fumaric acid and fumarate 3-oxypyridine under ionizing radiation on human cells. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 32-39. DOI:10.21514/1998-426X-2023-16-1-32-39. (In Russian).
- Cancer Cell Culture. Methods and Protocols. Ed. IA Cree. Second ed. Springer New York Dordrecht Heidelberg London: Human Press; 2011: 237–244.
- Savina NB, Uskalova DV, Sarapultseva EI. Application of the MTT test to study the long-term effects of acute γ -irradiation in crustaceans Daphnia magna. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2018;27(1): 86–93. DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-1-86-93. (In Russian).

19. Barata C, Varo I, Navarro JC, Arun S, Porte C. Antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in the freshwater cladoceran *Daphnia magna* exposed to redox cycling compounds. *Comparative Biochemistry and Physiology C Toxicology & Pharmacology*. 2005;140(2): 175–186. DOI: 10.1016/j.cca.2005.01.013.
20. Jemec A, Tišler T, Erjavec B, Pintar A. Antioxidant responses and whole-organism changes in *Daphnia magna* acutely and chronically exposed to endocrine disruptor bisphenol A. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012;86: 213–218. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.09.016.
21. Aebi H. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*. 1984;105: 121–126. DOI: 10.1016/S0076-6879(84)05016-3.
22. Sirota TV. Use of nitro blue tetrazolium in the autoxidation reaction of adrenaline to determine superoxide dismutase activity. *Biomeditsinskaya khimiya = Biomedical Chemistry*. 2013;59(4): 399–410. DOI: 10.18097/PBMC20135904399. (In Russian).
23. Szabó ER, Brand M, Hans S, Hideghéty K, Karsch L, Lessmann E, et al. Radiobiological effects and proton RBE determined by wildtype zebrafish embryos. *PLoS ONE*. 2018;13(11). DOI: 10.1371/journal.pone.0206879.
24. Lee KB, Lee JS, Park JW, Huh TL, Lee YM. Low energy proton beam induces tumor cell apoptosis through reactive oxygen species and activation of caspases. *Experimental & molecular medicine*. 2008;40: 118–29. DOI: 10.3858/emm.2008.40.1.118.
25. Ulanova TV, Inchina VI, Ruseykin NS, Khudoykina SV, Romanova EV. Study of antitumor activity of fumarate 3-oxypyridine in cell cultures. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Modern Problems of Science and Education*. 2016.26(2): 180–191. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201602.180-191. (In Russian).
26. Ulanova TV, Kotlyarov AA, Kakora SA, Shokina SV, Vypova ER, Komarova LN. Study of antitumor activity of fumarate 3-oxypyridine in cell cultures. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2022;6-10. DOI: 10.17513/spno.32253. (In Russian).
27. Usanova AA, Semenova EV, Inchina VI. Influence of 3-hydroxypyridine derivatives on lipid peroxidation processes in experimental acute carbon tetrachloride hepatitis. *Rossiyskiy zhurnal gastroenterologii, gepatologii, koloproktologii = Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*. 2009;19(1): 114–118. (In Russian).
28. Shakhmardanova SA, Gulevskaya ON, Khananashvili YaA, Zelenskaya AV, Nefedov DA, Galenko-Yaroshevskiy PA. Succinic and fumaric acid preparations as means of prevention and therapy of various diseases. *Zhurnal fundamental'noy meditsiny i biologii = Journal of Fundamental Medicine and Biology*. 2016;3: 16–30. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/preparaty-yantaroy-i-fumarovoy-kislot-kak-sredstva-profilaktiki-i-terapii-razlichnyh-zabolevaniy> [Accessed November 02, 2024]. (In Russian).
29. Novikov VE, Kovaleva LA, Losenkova SO, Klimkina EI. Pharmacology of antioxidants based on 3-oxypyridine. *Vestnik Smolenskoy gosudarstvennoy meditsinskoy akademii = Bulletin of the Smolensk State Medical Academy*. 2004;3. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/far-makologiya-antioksidantov-na-osnove-3-oksipiridina> [Accessed November 02, 2024]. (In Russian).
30. Harris KDM, Bartlett NJ, Lloyd VK. *Daphnia* as emerging epigenetic model organism. *Genetics research international*. 2012;1: 147892. DOI: 10.1155/2012/147892.
31. Petrosova DT, Uskalova DV, Kuzmicheva OV, Saburov VO, Sarapultseva EI. Enhancement of gold nanoparticles' cytotoxic effect under proton irradiation in *in vivo* experiments. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2024;69(4): 13–19. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-4-13-19. (In Russian).
32. Tretyakova MS, Belousov MV, Plotnikov EV. Radioprotection and radiosensitization: a modern view on radiomodulators in pharmacology. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2022;6-2. DOI:10.17513/spno.32262. (In Russian).

Received: December 03, 2024

For correspondence: Olga V. Kuzmicheva – Master's Student at Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Branch of the National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Program «Bioinformatics and Data Analysis in Biology and Medicine» (Studgorodok Str., 1, Obninsk, Kaluga region, 249030, Russia; E-mail: kuzmichevaov20@iate.ru)
ORCID: 0009-0002-3344-0099

Darya V. Uskalova – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor at the Department of Biotechnology, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Branch of the National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0001-8687-0872

Diana T. Degtyareva – Master's Student at Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Branch of the National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Program «Biomedical Research in Radiobiology», Obninsk, Russia
ORCID: 0009-0003-4600-1527

Tatyana V. Ulanova – Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Pharmacology, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Branch of the National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Obninsk, Russia
ORCID: 0000-0002-1371-4358

Sergey V. Shkavrov – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the Department of Biotechnology, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Branch of the National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Obninsk, Russia
ORCID: 0009-0009-0572-9427

Elena I. Sarapultseva – Doctor of Biological Sciences, Professor at the Department of Fundamental Medicine, National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0003-4747-5495

For citation: Kuzmicheva O.V., Uskalova D.V., Degtyareva D.T., Ulanova T.V., Shkavrov S.V., Sarapultseva E.I. Analysis of the radioprotective properties of 3-hydroxypyridine fumarate on an invertebrate animal model after proton irradiation in vivo. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 27–37. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-27-37

Уровни содержания радона в жилых и общественных зданиях западных районов Оренбургской области с высокими показателями заболеваемости населения злокачественными новообразованиями органов дыхания

Т.А. Кормановская¹, С.В. Гаевой², Л.В. Бондарь³, Д.В. Кононенко¹, К.А. Сапрыкин¹, Т.А. Балабина¹

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 Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Оренбургской области, Оренбург, Россия

³ Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области, Оренбург, Россия

Введение: В статье представлены результаты измерений содержания радона в воздухе эксплуатируемых жилых и общественных зданий трех районов западной части Оренбургской области (Бузурусланского, Бузулукского и Матвеевского), проведенных в 2021–2022 гг. Так как радон является второй по значимости причиной возникновения рака легкого после табакокурения, выбор районов для проведения радонометрических обследований был основан на показателях заболеваемости населения злокачественными новообразованиями органов дыхания в районах Оренбургской области за период 2009–2018 гг. **Материалы и методы:** Обследование с применением интегральных трековых радиометров радона проведено в 31 населенном пункте, где проживает от 83,5 % до 90,9 % жителей каждого района (9 населенных пунктов Бузурусланского района, 9 – Бузулукского района, 13 – Матвеевского района). **Результаты исследования и обсуждение:** Проведенный анализ результатов обследования 51 жилого и 45 общественных зданий трех районов показал, что в 45 жилых домах и в 25 зданиях общественного назначения содержание радона в воздухе помещений в 6 жилых домах не соответствует требованиям санитарных правил. Уровни содержания радона в воздухе помещений в 20 зданиях общественного назначения с некруглосуточным пребыванием людей необходимо проведение дополнительных исследований с использованием экспрессных или непрерывных методов определения содержания радона в воздухе помещений в часы эксплуатации зданий. Наибольшее число превышений установленного гигиенического норматива и наибольшая доля зданий жилого и общественного назначения с уровнями содержания радона в воздухе помещений, превышающими норматив, выявлены в населенных пунктах Матвеевского района. Максимальные значения среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона также получены в населенных пунктах Матвеевского района – 745 Бк/м³ (с. Старокутлумбетово) и 643 Бк/м³ (с. Кузькино). **Заключение:** Примененный при выборе районов для первоочередного обследования принцип, основанный на анализе показателей заболеваемости населения злокачественными новообразованиями органов дыхания, доказал свою эффективность: наиболее высокие уровни содержания радона были выявлены в районе с максимальными по области показателями заболеваемости населения злокачественными новообразованиями органов дыхания.

Ключевые слова: радон в воздухе помещений, объемная активность радона, интегральный метод измерений, трековый радиометр, рак легкого, злокачественные новообразования, Бузурусланский район, Бузулукский район, Матвеевский район, Оренбургская область.

Введение

Начиная с 2019 г. специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, Управления Роспотребнадзора по Оренбургской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» в рамках совместных научно-исследовательских работ проводятся исследования параметров радиационной обстановки в части природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) в различных районах Оренбургской области. Стартом шестилетнего

масштабного проекта, охватившего к настоящему времени 100 населенных пунктов в 15 районах и городских округах (ГО) Оренбургской области (продолжение исследований запланировано и на 2025 г.), послужило изучение показателей радиационной безопасности воды подземных источников питьевого водоснабжения в восточной части региона, в ходе которого с целью оценки структуры доз природного облучения жителей было выполнено комплексное радиационное обследование в населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского

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

районов и Ясненского ГО [1]. Результатом обследования стало выявление многочисленных фактов превышений гигиенического норматива содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых жилых домов и общественных зданий, причиной которых являлось интенсивное поступление радона в помещения из подстилающего грунта в контуре застройки зданий. Анализ структуры доз природного облучения показал, что для жителей отдельных населенных пунктов вклад дозы внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона в суммарную дозу облучения за счет всех ПИИИ составил около 95 % [2].

Полученные результаты явились важнейшим аргументом в пользу целесообразности расширения географии исследований уровней содержания радона в эксплуатируемых жилых и общественных зданиях, как основного дозобразующего фактора природного облучения населения, до всей территории Оренбургской области.

Цель исследования – радиационно-гигиеническая оценка уровней облучения населения Оренбургской области за счет ПИИИ. Для ее достижения в рамках выполняемого этапа работ была поставлена задача проанализировать и дать гигиеническую оценку уровням содержания радона в воздухе жилых и общественных зданий западных районов области, где зафиксированы максимальные показатели заболеваемости населения злокачественными новообразованиями органов дыхания.

Материалы и методы

Выбор объектов исследований

Выполненное в 2019 г. комплексное радиационное обследование населенных пунктов в 6 районах восточной части Оренбургской области проводилось в рамках Государственного контракта [1]. После завершения контракта в ситуации отсутствия финансирования проведение комплексных исследований всех ПИИИ уже не представлялось возможным; поэтому при планировании дальнейших работ по оценке уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий выбор объектов исследования был основан на показателях заболеваемости населения разных районов области злокачественными новообразованиями (ЗНО) органов дыхания [3]. Поскольку радон является второй по значимости причиной возникновения ЗНО органов дыхания после табакокурения [4–7], целесообразно было оценить уровни содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий именно в районах с повышенными показателями заболеваемости для последующей оценки возможного влияния радиационного фактора на возникновение ЗНО органов дыхания.

Анализ данных Форм федерального статистического наблюдения № 7 «Сведения о злокачественных новообразованиях»¹ Оренбургской области за 2009–2018 гг. показал, что наибольшие показатели заболеваемости населения ЗНО органов дыхания в Оренбургской области зафиксированы в Матвеевском, Кувандыкском, Бугурусланском, Бузулукском и Кваркенском районах (65,5; 60,3; 59,9; 59,6 и 59,2 случаев на 100 тыс. населения, соответственно, при среднем по Оренбургской области показателе на

уровне 44,5 случаев на 100 тыс. населения) [3]. Обследование жилых и общественных зданий Кваркенского района на содержание радона в воздухе помещений было проведено в 2019 г., Кувандыкского – в 2020 г. (оба района находятся в восточной части региона); в 2021–2022 гг. было выполнено радонометрическое обследование в Бугурусланском, Бузулукском и Матвеевском районах, расположенных на западе Оренбургской области.

Основной причиной высокого содержания радона в помещениях зданий является поступление радона из грунта под зданиями. В Оренбургской области сосредоточен значительный по величине и разнообразию минерально-сырьевой потенциал, обуславливающий потенциальную радоноопасность отдельных районов региона, связанную с повышенным содержанием ²²⁶Ra в породах. В Бугурусланском районе ведущими полезными ископаемыми являются нефть, газ, горючие сланцы, уголь [8]; в Бузулукском районе расположены месторождения нефти (Никифоровское, Воробьевское) и сырья для строительных материалов [9]. Территория Матвеевского района, расположенная на юго-западных отрогах Бугульминско-Белебеевской возвышенности, также богата нефтью; на территории района разведаны 13 месторождений углеводородного сырья, из которых эксплуатируются 8 [10, 11].

Объем, организация и метод исследований

В 2021 г. радонометрическое обследование было проведено в жилых и общественных зданиях 9 населенных пунктов, расположенных на территории Бугурусланского района (г. Бугуруслан, с. Михайловка, с. Ивановка, с. Завьяловка, п. Резвый, с. Пилугино, с. Нойкино, с. Советское, с. Елатомка), и 9 населенных пунктов, расположенных на территории Бузулукского района (г. Бузулук, п. Лисья Поляна, с. Жилинка, с. Палимовка, с. Сухоречка, с. Новоалександровка, п. Красногвардеец, с. Перевозинка, с. Елховка); в 2022 г. были обследованы 13 населенных пунктов Матвеевского района (с. Старокутлумбетьево, с. Тимошкино, с. Емельяновка, с. Кульчум, с. Борискино, с. Матвеевка, с. Новоспасское, с. Староякупово, с. Староаширово, с. Кузькино, с. Сарай-Гир, с. Новоаширово, с. Новоузели). Территориальное расположение обследованных районов показано на карте Оренбургской области на рисунке.

Общая численность населения Бугурусланского и Бузулукского районов составляла в 2021 г. 64255 и 115614 человек, соответственно; общая численность жителей населенных пунктов, где проводились измерения содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, – 56408 и 96572 человек, соответственно. В 2022 г. на территории Матвеевского района проживало 9396 человека; общая численность населения обследованных населенных пунктов составила 7989 человек. Таким образом, при проведении радонометрических обследований в трех районах западной части области с наибольшими показателями заболеваемости населения ЗНО органов дыхания – Бугурусланском, Бузулукском и Матвеевском – измерения были выполнены в населенных пунктах, где проживают 90,9 %, 83,5 % и 85,0 %, соответственно, от общего числа жителей всех территориальных образований, расположенных в этих районах.

¹ Форма федерального статистического наблюдения № 7 «Сведения о злокачественных новообразованиях». Утверждена приказом Росстата от 30.08.2019 № 479. [Federal statistical observation form No. 7 "Information on malignant neoplasms". Approved by Rosstat Order of 30.08.2019 No. 479. (In Russ.)]

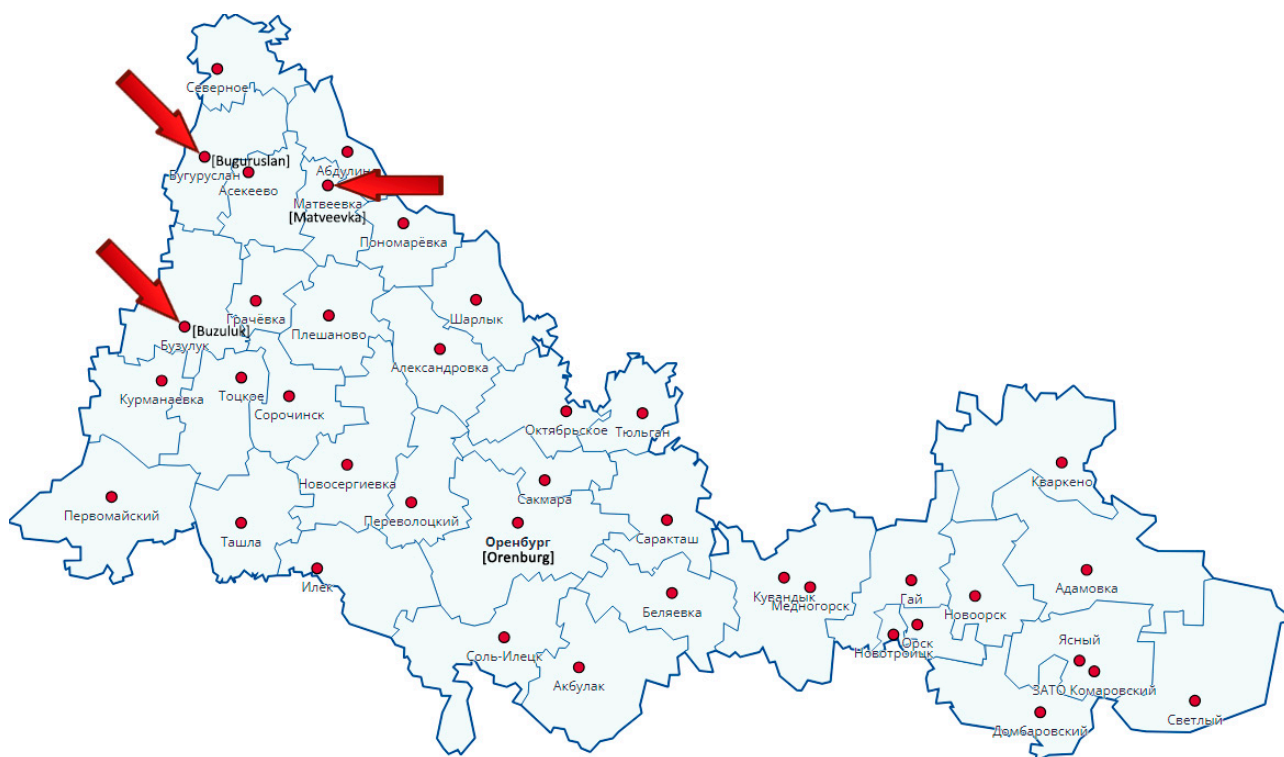


Рис. Карта Оренбургской области. Три западных района, обследованных в 2021–2022 гг., отмечены стрелками
[Fig.] Map of the Orenburg region. Three western districts surveyed in 2021–2022 are marked with arrows

При проведении радонометрического обследования использовался интегральный метод измерений объемной активности (ОА) радона в воздухе помещений [3]. В соответствии с методическими рекомендациями МР 2.6.1.0333-23² для жилых домов данный метод предпочтителен, так как дает наиболее объективную информацию о среднегодовом содержании радона в воздухе помещения; в общественных зданиях с некруглосуточным пребыванием людей интегральным методом определения ОА радона используется как скрининговый.

Организацию проведения измерений на местах обеспечивали специалисты филиала ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области в городе Бугуруслане, Абдулинском городском округе, Бугурусланском, Северном, Асекеевском, Матвеевском, Пономаревском районах»; подготовка и обработка после экспонирования интегральных трековых радиометров радона (ИТРП) были выполнены в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева с использованием Комплекта аппаратуры для измерения средней объемной активности радона в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М по аттестованной методике³. В каждом рай-

оне было расставлено по 150 ИТРП, однако из-за потерь (что, к сожалению, случается при измерениях этим методом, поскольку ИТРП расставляются на срок не менее 1 месяца в помещениях, где могут присутствовать обучающиеся, пациенты и другие посетители общественных зданий) для итогового анализа были использованы результаты измерений с помощью 446 ИТРП (доля потерь составила менее 1 %).

Результаты и обсуждение

В Бугурусланском районе радонометрическое обследование помещений в 2021 г. было проведено в 11 эксплуатируемых зданиях детских образовательных учреждений (2 детских сада и 9 школ), в 2 зданиях медицинских учреждений (фельдшерско-акушерский пункт (ФАП) и амбулатория), а также в 16 квартирах жилых домов. В Бугурусланском районе – в 12 эксплуатируемых зданиях детских образовательных учреждений (4 детских сада и 8 школ), в 1 здании медицинского учреждения (детская поликлиника), а также в 26 квартирах жилых домов. В Матвеевском районе в 2022 г. обследованием были охвачены 12 эксплуатируемых зданий детских образовательных учреждений (школы),

² 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.)]

³ Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом. Методика измерений. Разработана ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, ООО «ГК РЭИ». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.2И385 от 16.07.2012. [Radon. Measurement of indoor radon concentration using integral track method. Guidelines. Developed by Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene (Federal Medical-Biological Agency of Russia) and LLC "REI Group of Companies". Certified by VNIIFTRI, certificate No. 40090.2И385 dated 16.07.2012. (In Russ.)]

3 здания медицинских учреждений (2 ФАП и 1 больница), 2 здания учреждений культуры (дома культуры), 2 здания административного назначения (сельсоветы) и 9 жилых домов.

В соответствии с санитарными правилами и нормами (НРБ-99/2009⁴, СанПиН 2.6.1.2800-10⁵) нормируемой величиной содержания радона в воздухе помещений в Российской Федерации является среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) изотопов радона; при переходе от измеренной величины (ОА радона) к ЭРОА радона в соответствии с п. 2.5 МР 2.6.1.0333-23 использовался коэффициент равновесия $F_{\text{эф}}$, равный 0,5.

В таблице 1 представлены данные о количестве измерений, проведенных в жилых и общественных зданиях об-

следованных населенных пунктов, а также данные о количестве и доле результатов измерений, превысивших гигиенический норматив 200 Бк/м³.

В среднем по трем обследованным районам в западной части Оренбургской области доля результатов измерений, превысивших гигиенический норматив, составила 10,3 % (46 из 446), при этом максимальное значение зафиксировано в Матвеевском районе – 20,7 % (31 из 150).

В таблице 2 представлены результаты оценки среднегодовой ЭРОА радона в воздухе жилых и общественных зданий для каждого из обследованных населенных пунктов.

Таблица 1

Число измерений (ЧИ) ОА радона и число (ЧП) и доля (%) превышений гигиенического норматива в жилых и общественных зданиях в обследованных населенных пунктах

[Table 1

Number of measurements (NM) of indoor radon concentration in dwellings and public buildings in surveyed settlements, number (NE) and percentage (%) of exceedances of the established action level (200 Bq/m³ annual average radon isotopes EEC)]

Населенный пункт [Settlement]	Общественные здания [Public buildings]			Жилые здания [Dwellings]		
	ЧИ [NM]	ЧП [NE]	%	ЧИ [NM]	ЧП [NE]	%
Бугурусланский район [Buguruslanskiy district]						
г. Бугуруслан [Buguruslan]	–	–	–	30	1	3,3
с. Михайловка [Mikhaylovka]	16	1	6,3	18	2	11,1
с. Ивановка [Ivanovka]	6	1	16,7	–	–	–
с. Завьяловка [Zav'yalovka]	12	1	8,3	–	–	–
п. Резвый [Rezvy]	13	0	0	–	–	–
с. Пилюгино [Pilyugino]	20	1	5,0	–	–	–
с. Нойкино [Noykino]	12	3	25	–	–	–
с. Советское [Sovetskoe]	10	0	0	–	–	–
с. Елатомка [Elatomka]	10	0	0	–	–	–
Бузулукский район [Buzulukskiy district]						
г. Бузулук [Buzuluk]	70	3	4,2	40	1	2,5
п. Лисья Поляна [Lis'ya Polyana]	8	0	0	–	–	–
с. Жилинка [Zhilinka]	6	0	0	–	–	–
с. Палимовка [Palimovka]	8	0	0	–	–	–
с. Сухоречка [Sukhorechka]	8	1	12,5	–	–	–

⁴ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534). [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.)]

⁵ Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 № 171 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 27.01.2011, регистрационный № 19587). [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 27.01.2011, registration No. 19587). (In Russ.)]

Населенный пункт [Settlement]	Общественные здания [Public buildings]			Жилые здания [Dwellings]		
	ЧИ [NM]	ЧП [NE]	%	ЧИ [NM]	ЧП [NE]	%
с. Новоалександровка [Novoaleksandrovka]	–	–	–	2	0	0
п. Красногвардеец [Krasnogvardeets]	–	–	–	2	0	0
с. Перевозинка [Perevozinka]	–	–	–	3	0	0
с. Елховка [Elkhovka]	–	–	–	2	0	0
Матвеевский район [Matveevskiy district]						
с. Старокутлумбетово [Starokutlumbet'ovo]	25	10	40,0	9	0	0
с. Тимошкино [Timoshkino]	10	2	20,0	3	0	0
с. Емельяновка [Emel'yanovka]	16	1	6,3	9	5	55,6
с. Кульчум [Kul'chum]	10	0	0	–	–	–
с. Борискино [Boriskino]	5	0	0	6	0	0
с. Матвеевка [Matveevka]	15	3	20,0	–	–	–
с. Новоспасское [Novospasskoe]	10	0	0	–	–	–
с. Староякупово [Staroyakupovo]	5	1	20,0	–	–	–
с. Староаширово [Staroashirovo]	5	2	40,0	–	–	–
с. Кузькино [Kuz'kino]	5	3	60,0	–	–	–
с. Сарай-Гир [Saray-Gir]	5	0	0	–	–	–
с. Новоаширово [Novoashirovo]	5	0	0	–	–	–
с. Новоузели [Novouzeli]	7	4	57,1	–	–	–

Таблица 2

**Результаты оценки среднегодовой ЭРОА радона в жилых и общественных зданиях
в обследованных населенных пунктах**

[Table 2]

Estimated annual average radon EEC in dwellings and public buildings in surveyed settlements

Населенный пункт [Settlement]	Среднегодовая ЭРОА изотопов радона, Бк/м³ [Annual average radon EEC, Bq/m³]					
	Общественные здания [Public buildings]			Жилые здания [Dwellings]		
	мин. [min]	медиана [median]	макс. [max]	мин. [min]	медиана [median]	макс. [max]
Бугурусланский район [Buguruslanskiy district]						
г. Бугуруслан [Buguruslan]	–	–	–	20	59	225
с. Михайловка [Mikhaylovka]	23	85	258	18	88	258
с. Ивановка [Ivanovka]	45	81	420	–	–	–
с. Завьяловка [Zav'yalovka]	20	59	200	–	–	–
п. Резвый [Rezvy]	5	55	83	–	–	–
с. Пилюгино [Pilyugino]	8	36	243	–	–	–
с. Нойкино [Noykino]	23	107	420	–	–	–
с. Советское [Sovetskoe]	25	90	168	–	–	–
с. Елатомка [Elatomka]	15	56	135	–	–	–

Населенный пункт [Settlement]	Среднегодовая ЭРОА изотопов радона, Бк/м ³ [Annual average radon EEC, Bq/m ³]					
	Общественные здания [Public buildings]			Жилые здания [Dwellings]		
	мин. [min]	медиана [median]	макс. [max]	мин. [min]	медиана [median]	макс. [max]
Бузулукский район [Buzulukskiy district]						
г. Бузулук [Buzuluk]	15	56	242	5	40	364
п. Лисья Поляна [Lis'ya Polyana]	30	42	105	–	–	–
с. Жилинка [Zhilinka]	55	118	141	–	–	–
с. Палимовка [Palimovka]	30	49	183	–	–	–
с. Сухоречка [Sukhorechka]	37	58	283	–	–	–
с. Новоалександровка [Novoaleksandrovka]	–	–	–	45	53	60
п. Красногвардеец [Krasnogvardeets]	–	–	–	35	41	47
с. Перевозинка [Perevozinka]	–	–	–	35	45	75
с. Елховка [Elkhovka]	–	–	–	35	43	50
Матвеевский район [Matveevskiy district]						
с. Старокутлумбетьево [Starokutlumbet'evoy]	53	170	745	63	92	155
с. Тимошкино [Timoshkino]	38	89	234	58	125	125
с. Емельяновка [Emel'yanovka]	37	109	400	88	205	323
с. Кульчум [Kul'chum]	58	94	158	–	–	–
с. Борискино [Boriskino]	140	143	169	40	76	183
с. Матвеевка [Matveevka]	35	83	248	–	–	–
с. Новоспасское [Novospasskoye]	58	79	150	–	–	–
с. Староякупово [Staroyakupovo]	73	100	105	–	–	–
с. Староаширово [Staroashirovo]	70	195	350	–	–	–
с. Кузькино [Kuz'kino]	145	245	643	–	–	–
с. Сарай-Гир [Saray-Gir]	48	95	130	–	–	–
с. Новоаширово [Novoashirovo]	70	100	164	–	–	–
с. Новоузели [Novouzeli]	63	215	290	–	–	–

Как говорилось выше, при обследовании жилых и общественных зданий в населенных пунктах Матвеевского района результат каждого пятого из выполненных измерений превышал значение гигиенического норматива содержания радона. Максимальные оценки среднегодовой ЭРОА радона в общественных зданиях района составили 745 Бк/м³ (с. Старокутлумбетьево) и 643 Бк/м³ (с. Кузькино), что более чем в три раза превышает установленный санитарными правилами норматив. Медианные значения (означающие, что половина результатов измерений превышает данный уровень) ЭРОА радона в воздухе жилых и общественных зданий составили: для Бугурусланского района – 70 Бк/м³, для Бузулукского района – 53 Бк/м³, для Матвеевского района – 124 Бк/м³.

В жилых домах гигиенический норматив содержания радона в воздухе был превышен не более чем двукратно, причем

из 51 обследованной жилой единицы (дома, квартиры) в трех районах области только в одном случае повышенное содержание радона в воздухе зафиксировано в квартире многоэтажного дома (г. Бузулук); в подавляющем большинстве случаев ситуация интенсивного поступления радона в воздух жилых помещений наблюдается в частных домах в сельской местности (с. Михайловка Бугурусланского района, с. Емельяновка Матвеевского района), построенных, как правило, в 1970-х гг. прошлого века и ранее, для которых характерно наличие подпола и отсутствие вентилируемого подвала. В результате проведенного в жилых домах радонометрического обследования получены следующие данные:

– в Бугурусланском районе значения ЭРОА радона свыше 200 Бк/м³, превышающие гигиенический норматив, выявлены в 1 частном доме в г. Бугуруслан и 2 частных домах в с. Михайловка, причем в каждом из домов пре-

вышения зафиксированы только в 1 из 3 обследованных помещений;

- в Бузулукском районе превышение гигиенического норматива выявлено в квартире в г. Бузулук;
- в Матвеевском районе превышения гигиенического норматива выявлены в 2 частных домах в с. Емельяновка, причем значения ЭРОА радона свыше 200 Бк/м³ получены во всех обследованных помещениях.

В соответствии с п. 5.12 МР 2.6.1.0333-23 результаты оценки среднегодовых значений ЭРОА радона в воздухе жилых помещений, полученные с применением интегрального метода измерений ОА радона, являются наиболее объективными для проведения санитарно-эпидемиологической оценки соответствия жилых помещений требованиям радиационной безопасности. Таким образом, полученные результаты дают основание утверждать, что содержание радона в воздухе помещений в 6 из 51 обследованных жилых единиц не соответствует требованиям санитарных правил. Поскольку все обследованные объекты являются эксплуатируемыми (как правило, речь идет о многолетнем проживании), решение о целесообразности проведения мероприятий по снижению содержания радона в воздухе должны принимать собственники жилых помещений.

Все остальные обследованные в рамках НИР в 2021–2022 гг. жилые единицы (дома, квартиры) в населенных пунктах Бугурусланского, Бузулукского и Матвеевского районов соответствуют требованиям санитарных правил по содержанию радона в воздухе помещений.

В обследованных эксплуатируемых зданиях общественного назначения Бугурусланского района значения ЭРОА радона свыше 200 Бк/м³, превышающие гигиенический норматив, были получены в 4 зданиях детских учреждений: в с. Михайловка, с. Ивановка, с. Пилугино (превышения были зафиксированы только в одном из помещений здания) и с. Нойкино (превышения в 3 из 6 помещений).

В Бузулукском районе единичные превышения гигиенического норматива были выявлены в 2 дошкольных учреждениях и одном учреждении здравоохранения г. Бузулук и одной школе в с. Сухоречка.

В Матвеевском районе число общественных зданий, в которых были выявлены превышения гигиенического норматива (как единичные, так и достигающие 80 % от всех выполненных в учреждении измерений), значительно больше:

- в 4 зданиях (детское образовательное учреждение, учреждение культуры, административное здание, медицинское учреждение) с. Старокутлумбетьево;
- в 6 зданиях детских образовательных учреждений, расположенных в селах Емельяновка, Матвеевка, Старокупово, Староширово, Кузькино, Новоузели;
- в 2 зданиях (дом культуры, администрация) с. Тимошкино.

Таким образом, по результатам радонометрического обследования превышения гигиенического норматива содержания радона в воздухе помещений выявлены в 12 из 19 обследованных зданий общественного назначения Матвеевского района.

Если при обследовании жилых домов с помощью интегрального метода измерений ОА радона превышение среднегодовой ЭРОА радона в воздухе помещений гигиенического норматива свидетельствует о несоответствии помещений требованиям радиационной безопасности,

то при обследовании зданий общественного назначения результаты измерений, полученные данным методом, трактуются иначе: в соответствии с пп. 5.19–5.20 МР 2.6.1.0333-23, по причине консервативности метода [12], при соответствии уровней содержания радона требованиям НРБ-99/2009 и СанПиН 2.6.1.2800-10 здание признается соответствующим требованиям радиационной безопасности; в противном случае решение принимается по итогам дополнительных измерений содержания радона экспрессным или непрерывным методом в часы нахождения в учреждении работников и посетителей (воспитанников, пациентов и пр.). Следовательно, по результатам скринингового радонометрического обследования в населенных пунктах Матвеевского района 7 зданий общественного назначения могут быть признаны соответствующими требованиям санитарных правил, а в 12 зданиях необходимо проведение дополнительного обследования.

Выводы

Проведенный анализ результатов радонометрического обследования 51 жилого и 45 общественных зданий трех районов западной части Оренбургской области (Бугурусланского, Бузулукского и Матвеевского), для которых характерны высокие показатели заболеваемости населения ЗНО органов дыхания, позволяет сделать следующие выводы:

- содержание радона в 45 обследованных жилых домах и квартирах и в 25 обследованных зданиях общественного назначения (учреждения образования, культуры, здравоохранения, административные здания) соответствует требованиям НРБ-99/2009 и СанПиН 2.6.1.2800-10;
- содержание радона в 6 обследованных жилых домах и квартирах не соответствует требованиям НРБ-99/2009 и СанПиН 2.6.1.2800-10;
- в 20 обследованных зданиях общественного назначения с некруглосуточным пребыванием людей необходимо проведение дополнительных обследований в соответствии с методическими рекомендациями МР 2.6.1.0333-23 для принятия решения о соответствии или несоответствии требованиям НРБ-99/2009 и СанПиН 2.6.1.2800-10;
- жилые и общественные здания с превышением гигиенического норматива по содержанию радона в воздухе помещений выявлены во всех трех районах;
- максимальные значения среднегодовых ЭРОА радона, наибольшие медианные значения ЭРОА радона, наибольшее число превышений установленного гигиенического норматива и наибольшая доля зданий жилого и общественного назначения с высокими уровнями содержания радона в воздухе помещений выявлены в населенных пунктах Матвеевского района;
- примененный при выборе районов для первоочередного обследования принцип, основанный на анализе показателей заболеваемости населения ЗНО органов дыхания [3], доказал свою эффективность: наиболее высокие уровни содержания радона были выявлены в районе с максимальными по области показателями заболеваемости населения ЗНО органов дыхания.

Заключение

Подводя итог вышесказанному, можно констатировать, что вопросы обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ актуальны не только для во-

сточной, но также для западной части Оренбургской области.

На сегодняшний день для всех регионов Российской Федерации достаточно остро стоит проблема контроля обеспечения радиационной безопасности в эксплуатируемых зданиях и сооружениях: в отношении общественных зданий (в том числе детских дошкольных и образовательных учреждений) действует мораторий на плановые проверки⁶, в жилых домах проведение радиационно-гигиенического обследования зависит от воли собственников. В этих непростых условиях результаты выполняемой специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, Управления Роспотребнадзора по Оренбургской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» инициативной НИР «Радиационно-гигиеническая оценка уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в районах Оренбургской области с повышенными показателями заболеваемости ЗНО органов дыхания» позволяют получить достоверную актуальную информацию об уровнях содержания радона в воздухе помещений, оценить степень защищенности населения Оренбургской области при облучении ПИИИ и в дальнейшем предложить мероприятия по снижению риска возникновения радон-индуцированного рака легкого.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кормановская Т.А. является ответственным исполнителем НИР, разработала дизайн исследования, определила цели и задачи, написала черновик рукописи и представила окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Гаевой С.В. обеспечил организацию исследования и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Бондарь Л.В. обеспечил установку и сбор трековых радиометров и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кононенко Д.В. принимал участие в лабораторных работах с трековыми радиометрами, провел статистическую обработку данных, подготовил таблицы и рисунок, английский перевод и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. провел поиск и анализ литературных источников и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Балабина Т.А. руководила лабораторными работами с трековыми радиометрами (сборка, разборка, травление, считывание показаний) и отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Разработка и научное обоснование рекомендаций по планированию,

организации и внедрению программ по снижению уровней облучения населения от природных источников ионизирующего излучения на уровне субъектов Российской Федерации с целью уменьшения рисков заболеваемости населения злокачественными новообразованиями».

Литература

1. Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е. и др. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования населенных пунктов восточных районов Оренбургской области // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 6–18. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18.
2. Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е. и др. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 2: Дозы облучения населения восточных районов Оренбургской области // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 7–18. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-7-18.
3. Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 3: Принципы планирования радиометрических обследований // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 34–43. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-34-43.
4. National Research Council. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999. 516 p.
5. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press, 2009. 110 p.
6. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону. Перевод публикации 115 МКРЗ / под ред. М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2013. 92 с.
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. 88 с.
8. Гривко Е.В., Архипов А.Д., Богомолова А.А. Сравнительный анализ природного потенциала западного Оренбуржья на примере Бугурусланского и Абдулинского районов // Известия ОГАУ. 2017. № 4 (66). С. 237–240.
9. Бузулукский район. Администрация муниципального образования. Паспорт района. URL: <http://old2-bz.orb.ru/about/pasport-rayona/> (Дата обращения: 20.01.2025).
10. Администрация муниципального образования Матвеевский район Оренбургской области. Инвестиционный паспорт. URL: <https://matveevka56.orb.ru/documents/active/251350/> (Дата обращения: 20.01.2025).
11. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Оренбургской области на 15.03.2021 г. URL: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/b1ed3ce2b7dff8142daf36cec9dd3b76.pdf> (Дата обращения: 20.01.2025).
12. Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В. и др. Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 29–40. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.

Поступила: 20.01.2025

⁶ Постановление Правительства Российской Федерации от 10.03.2023 № 372 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и признании утратившим силу отдельного положения акта Правительства Российской Федерации». [Decree of the Government of the Russian Federation of 10.03.2023 No. 372 "On amending certain acts of the Government of the Russian Federation and invalidation of a separate provision of an act of the Government of the Russian Federation". (In Russ.)]

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

Гаевой Сергей Васильевич – начальник отдела надзора на транспорте, за условиями труда и радиационной безопасностью Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Оренбургской области, Оренбург, Россия

Бондарь Леонид Владимирович – заведующий отделением факторов производственной среды и радиационной гигиены ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области», Оренбург, Россия

Кононенко Дмитрий Викторович – научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-1392-1226

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

Балабина Татьяна Анатольевна – ведущий инженер-исследователь лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0009-0003-7112-510X

Для цитирования: Кормановская Т.А., Гаевой С.В., Бондарь Л.В., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А., Балабина Т.А. Уровни содержания радона в жилых и общественных зданиях западных районов Оренбургской области с высокими показателями заболеваемости населения злокачественными новообразованиями органов дыхания // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 38–48. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-38-48

Indoor radon concentrations in dwellings and public buildings in the western districts of the Orenburg region with increased respiratory system cancer morbidity rates

Tatyana A. Kormanovskaya¹, Sergey V. Gaevoy², Leonid V. Bondar³, Dmitry V. Kononenko¹, Kirill A. Saprykin¹,
Tatyana A. Balabina¹

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

² Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Orenburg Region, Orenburg, Russia

³ Center of the Hygiene and Epidemiology in the Orenburg region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Orenburg, Russia

Introduction: The paper presents results of a radon survey conducted in 2021–2022 in existing dwellings and public buildings in 31 settlements of three districts of the western part of the Orenburg region (Buguruslanskiy, Buzulukskiy and Matveevskiy districts). Since exposure to radon and its progeny is the second leading cause of lung cancer after tobacco smoking, the selection of the districts for the survey was based on average standardized trachea, bronchi, and lung cancer morbidity rates in the districts of the Orenburg region for 2009–2018. Materials and Methods: The survey was conducted using solid-state nuclear track detectors in 31 settlements of the districts, where 83.5 % to 90.9 % of the population of each district live (9 settlements in Buguruslanskiy district, 9 in Buzulukskiy district, and 13 in Matveevskiy district). Results and Discussion: The results of measurements taken in 51 dwellings and 45 public buildings in three districts showed that in 45 dwellings and 25 public buildings indoor radon concentrations do not exceed the established hygienic norm (action level) of 200 Bq/m³ (EEC) adopted in Russia for existing buildings. In six dwellings the action level is exceeded; in 20 public buildings with non-round-the-clock

Tatyana A. Kormanovskaya

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: f4dos@mail.ru

occupancy, additional measurements using instant or continuous methods during building operating hours are required. The highest values of annual average indoor radon EEC were obtained in the settlements of the Matveevskiy district: 745 Bq/m³ in Starokutlumbet'vo and 643 Bq/m³ in Kuz'kino. The largest number and percentage of exceedances of the established action level were also found in the settlements of the Matveevskiy district. Conclusion: The principle applied in the selection of districts for priority survey, based on the analysis of average standardized trachea, bronchi, and lung cancer morbidity rates, proved its effectiveness: the highest levels of indoor radon concentration were found in the district with the highest trachea, bronchi, and lung cancer morbidity rate in the Orenburg region.

Key words: indoor radon, radon concentration, integrated measurement method, SSNTD, lung cancer, malignant neoplasms, Buguruslanskiy district, Buzulukskiy district, Matveevskiy district, Orenburg region.

Authors' personal contribution

Kormanovskaya T.A., the responsible executive of the research, developed the design of the survey, defined the goals and objectives, wrote a draft of the manuscript, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Gaevoy S.V. provided the organization of the field research and edited the interim version of the manuscript.

Bondar L.V. organized the deployment and collection of solid-state nuclear track detectors (SSNTDs) and edited an interim version of the manuscript.

Kononenko D.V. participated in the laboratory work with SSNTDs, conducted statistical analysis of radon concentration data, prepared the tables and the figure, made the translation and edited the interim version of the manuscript.

Saprykin K.A. searched and analyzed literature data and edited the interim version of the manuscript.

Balabina T.A. supervised laboratory work with SSNTDs (assembling, disassembling, etching, readout) and edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025 “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Development and scientific substantiation of recommendations for planning, organizing and implementing programs to reduce the levels of public exposure due to natural sources of ionizing radiation on the regional level in order to reduce the risks of malignant neoplasms morbidity of the population of the Russian Federation”.

References

1. Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Vyaltina NE, Gaevoy SV, Bondar LV, Kononenko DV, et al. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 1: Results of the comprehensive survey of settlements in the eastern districts of the Orenburg region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 6–18. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18.
2. Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Vyaltina NE, Gaevoy

SV, Kononenko DV, Saprykin KA, et al. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 2: Doses to the population of the eastern districts of the Orenburg region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 7–18. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-7-18.

3. Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Saprykin KA. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 3: Approaches to radon survey planning. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 34–43. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-34-43.
4. National Research Council. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington, D.C.: National Academy Press; 1999. 516 p.
5. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press; 2009. 110 p.
6. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. *Annals of the ICRP*. 2010; 40(1). 64 p.
7. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Annals of the ICRP*. 2014; 43(3). 73 p.
8. Grivko YeV, Arkhipov AD, Bogomolova AA. Comparative analysis of natural potentials of the West Orenrurzhye on the pattern of Buguruslanskiy and Abdulinskiy districts. *Izvestiia Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2017;4(66): 237–240. (In Russian).
9. Municipal administration of the Buzulukskiy district, Orenburg region. Passport of the district. Available from: <http://old2-bz.orb.ru/about/pasport-rayona/> [Accessed 20 Jan 2025]. (In Russian).
10. Municipal administration of the Matveevskiy district, Orenburg region. Investment passport. Available from: <https://matveevka56.orb.ru/documents/active/251350/> [Accessed 20 Jan 2025]. (In Russian).
11. Information on the state and prospects of using the mineral resource base of the Orenburg region as of 15.03.2021. Available from: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/b1ed3ce2b7dff8142daf36cec9dd3b76.pdf> [Accessed 20 Jan 2025]. (In Russian).
12. Vasilyev AS, Romanovich IK, Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Saprykin KA, Balabina TA. Substantiation of methodical approaches to the control of indoor radon concentration in existing public buildings with non-round-the-clock stay of people. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 29–40. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.

Received: January 20, 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

Sergey V. Gaevoy – Head of the Department of the Surveillance on Transport, Working Conditions and Radiation Hygiene, Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Orenburg region, Orenburg, Russia

Leonid V. Bondar – Head of the Radiation Hygiene Department of the Center of Hygiene and Epidemiology in the Orenburg region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Orenburg, Russia

Dmitry V. Kononenko – Researcher, Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-1392-1226

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

Tatyana A. Balabina – Leading Research Engineer, Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0003-7112-510X

For citation: Kormanovskaya T.A., Gaevoy S.V., Bondar L.V., Kononenko D.V., Saprykin K.A., Balabina T.A. Indoor radon concentrations in dwellings and public buildings in the western districts of the Orenburg region with increased respiratory system cancer morbidity rates. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 38–48. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-38-48

Состояние слизистой оболочки желудка у персонала, контактирующего с соединениями трития

С.В. Поволоцкая, С.С. Сокольников

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства,
Озерск, Россия

Целью работы была оценка состояния слизистой оболочки желудка у персонала атомного предприятия, контактирующего с соединениями трития в штатных условиях производственного цикла. В работе представлены результаты серологического скрининга состояния желудка группы работников, подвергающихся хроническому β -облучению трития в допустимых дозах. Для выявления признаков патологических изменений состояния желудка использовался неинвазивный метод количественного определения в сыворотке крови ключевых биомаркеров структуры и функционального состояния желудка – пепсиногенов (ПГ1 и ПГ2), гастрин-17 (Г-17), и степени инфицирования желудка бактерией *Helicobacter pylori* (IgG антитела к *Helicobacter pylori*) с помощью тест-систем Гастропанель. Установлено: инфицированность *Helicobacter pylori* персонала зависела от возраста на дату обследования и пола, в целом составляла 55,6 %. Серологические признаки отклонений в состоянии слизистой желудка выявлены у 57,5 % работников, в 9 % – предракового состояния, атрофического гастрита, в 43 % – неатрофического *Helicobacter pylori*-ассоциированного гастрита с потенциальным риском атрофических изменений слизистой, в 9,3 % – гиперсекреторного неатрофического гастрита с высоким кислотным выбросом и риском язвенной болезни. Заметный рост частоты выявления выраженных атрофических изменений слизистой желудка начинался после 50 лет. Частота серологических признаков атрофического и неатрофического гастрита в обследованной группе не превышала значений, полученных ранее в группе жителей города, никогда не контактировавших с источниками ионизирующих излучений. Около трети работников с высокими рисками тяжелой гастропатологии (36 % с признаками атрофии, 20 % с признаками эрозивно-язвенного поражения слизистой желудка) были бессимптомны, гастродуоденальных заболеваний в анамнезе не имели, за медицинской помощью не обращались. Выводы: инфицированность желудка *Helicobacter pylori* и распространенность признаков патологических изменений слизистой оболочки желудка в группе персонала, работающего с соединениями трития, соответствовала показателям последних отчетственных исследований. 18,3 % работников по серологическим признакам составили группу повышенного риска рака желудка и язвенной болезни, нуждающихся в дальнейшем наблюдении с использованием базовых эндоскопических и морфологических методов и принятии медицинских решений.

Ключевые слова: персонал, тритий, желудок, прогностические биомаркеры, *Helicobacter pylori*, ГастроПанель, группа риска.

Введение

Гастродуоденальная патология занимает одну из лидирующих позиций в структуре заболеваний у работников, профессионально контактирующих с источниками ионизирующих излучений. Связь с радиационным воздействием заболеваний желудка – хронического гастрита, язвенной болезни, злокачественных новообразований – показана в ряде клинических и эпидемиологических исследований [1-3]. Увеличение распространенности атрофического гастрита, язвенной болезни выявлено в случаях аварийного и хронического профессионального облучения у работников предприятий атомной промышленности, участников послеаварийных работ на ЧАЭС, среди жителей радиоактивно загрязненных территорий [4-7]. Рост заболеваемости раком желудка, связанный с профессиональным внешним γ -облучением, показан в когорте работников ядерного комплекса Производственного объединения (ПО) «Маяк» [8]. Лица с хроническим атрофическим гастритом или кишечной метаплазией представляют группу повышенного риска развития аденокарциномы желудка [9]. В условиях высокой

заболеваемости раком желудка выделение групп риска представляет важный этап в стратегии профилактики желудочного канцерогенеза. Формирование таких групп существенно повышает эффективность ранней диагностики предопухолевых изменений слизистой оболочки желудка (СОЖ) и раннего рака с целью проведения превентивных мероприятий, определения методов наблюдения, реабилитации и своевременного лечения [10].

В связи с реальной возможностью использования термоядерной энергии расширением контингента лиц, работающих с промышленными соединениями трития (^3H), особый интерес представляет изучение соматических эффектов изотопа [11, 12]. Тритий относят к наиболее опасным для здоровья радионуклидам. Обладая политропным воздействием на организм, тритий считается значительно более токсичным по сравнению с другими гамма- и бета-излучателями (^{137}Cs , ^{106}Ru), имеющими такой же характер распределения. Согласно материалам НКДАР ООН, значения относительной биологической эффективности излучения (ОБЭ) трития, оцениваются как 1,5 и 2-2,5 по сравнению с рентгеновским и гамма-излучением соответственно [11],

Сокольников Софья Сергеевна

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456780, Россия, Озерск, Озерское шоссе, 19; E-mail: sokolnikova_s@subi.su

приводя к повреждениям клеток и биологически активных молекул. Повреждающее действие трития обусловлено содержанием изотопа в жидкой фазе организма, распределенного практически равномерно по всем органам и тканям, и его инкорпорацией в структурные элементы различных тканей. Равномерное распределение изотопа в водной фазе организма человека приближает биологические эффекты трития к таковым от общего равномерного гамма-облучения. Накопление трития в органических структурах при хроническом поступлении изотопа создает высокие микролокальные дозы. Способность органических соединений трития замещать водород в молекуле ДНК может приводить к повреждению генетического материала, увеличению периода полувыведения, что определяет высокий риск отдаленных последствий [12, 13]. Высокий бластоогенный эффект окиси трития, широко представленный в эксперименте, связывают с внедрением значительных количеств изотопа в структурные элементы органов и тканей с преимущественным депонированием в РНК и ДНК [12, 14].

Уровни облучения персонала в период становления отечественного тритиевого производства были очень высокими. Среднегодовые эквивалентные дозы внутреннего облучения тритием наиболее облучаемых критических групп персонала на ПО «Маяк» составляли от 40 до 177 сЗв при ОБЭ 2,5. К 2000 году в результате реализации комплекса инженерно-технических, санитарно-гигиенических и организационных мероприятий облучаемость критической группы снизилась на 2 порядка и составила в среднем 0,4сЗв/год [15]. Значительные эффективные дозы (от 110 до 1250 мЗв) регистрировались также по результатам цитогенетического анализа, у персонала, длительно подвергавшегося хроническому воздействию β -излучения трития, на других предприятиях атомной промышленности [16]. Согласно результатов недавних исследований, максимальные значения содержания трития (НТО) в пробах мочи персонала основных цехов тритиевого производства на ПО «Маяк» (250 кБк/дм³) соответствовали мощности эффективной дозы на уровне 4мЗв/год, что значительно ниже нормируемых величин [17]. Современные данные о действии соединений трития в производственных условиях ограничены оценкой, преимущественно, генотоксических и цитогенетических эффектов [16, 18, 19]. Несмотря на большой объем исследований радиационных эффектов изотопа малоизученной остается проблема медицинских последствий профессионального облучения персонала, работающего с тритием.

Цель исследования – изучение и оценка состояния СОЖ у персонала, контактирующего с соединениями трития в регламентных условиях производственного цикла.

Задачи исследования

1. Оценить распространенность признаков патологических изменений и степень инфицированности СОЖ бактерией *Helicobacter pylori* (*H.p.*) с использованием серологических прогностических биомаркеров;

2. Выделить группы работников с признаками повышенного риска рака или язвенно-эрозивного поражения слизистой оболочки желудка.

Материалы и методы

Объектом исследования была группа работников химического завода ПО «Маяк», контактирующих с соединениями трития. Работники привлекались к обследованию в период прохождения ежегодного медицинского осмотра на базе КБ №71 г. Озерска. Критериями включения в основную группу было место и характер выполняемой работы, где возможен контакт с изотопом, и возраст не моложе 30 лет. Ограничений по полу, этнической принадлежности, образовательному уровню, длительности контакта с профессиональными факторами, наличием предшествующей гастродуоденальной патологии не предусматривалось. Критерием исключения из обследования было наличие острого заболевания или обострения основных хронических заболеваний. В исследовании приняли участие 153 работника химического завода в возрасте на дату обследования от 30 до 70 (в среднем $43,2 \pm 0,7$ лет). Стаж работы на химическом заводе составлял в среднем $15,6 \pm 0,8$ лет, около 90 % начали работать на химическом заводе с 1990 года (годы найма 1969–2020 гг.). Дозиметрическая характеристика исследованной группы на сегодняшний день представлена только показателями объемной активности (ОА) трития в пробах мочи персонала: суммарной активности трития, активности трития в водной фазе (ОА НТО), активности органических соединений трития (ОА ОСТ) [17]. Среднее значение ОА трития в водной фазе по всей группе составляло 7,5 кБк/дм³, максимальное значение ОА НТО 250 кБк/дм³ что соответствовало мощности эффективной дозы 4 мЗв в год.

Перед проведением обследования каждый участник подписывал информированное согласие на участие и использование его персональных данных. Обследование состояло из анкетирования, включавшего демографические и некоторые профессиональные данные (профмаршрут), интервьюирования участников по разработанному валидизированному вопроснику с перечнем вопросов о наличии гастроинтестинальных симптомов и заболеваний желудка, проведенных инструментальных обследованиях, анамнеза эрадикации *H.p.*, вредных привычках (употребление алкоголя, курение), наследственном анамнезе (наличие гастродуоденальных заболеваний у родственников); изучался медицинский анамнез работников; у всех участников группы были взяты образцы венозной крови для лабораторного анализа.

Для оценки состояния слизистой оболочки желудка использовался неинвазивный метод серологической диагностики, включающий определение в сыворотке крови ключевых биомаркеров структуры и функционального состояния СОЖ [20]. В сыворотке крови измеряли уровни: пепсиногена 1 (ПГ1), маркера слизистой оболочки фундального отдела (тела) желудка, пепсиногена 2 (ПГ2), маркера воспаления слизистой оболочки желудка в целом, гастрин-17 (Г-17) маркера слизистой оболочки антрального отдела желудка и IgG антител к *H. p.* (*AT H.p.*), маркера инфицированности СОЖ. Образцы сыворотки тестировали с помощью тест-панели диагностики для иммуноферментного анализа «ГастроПанель» (Biohit, Финляндия). Анализ выполнялся по стандартному протоколу производителя тест-систем, в качестве референтных принимали значения биомаркеров, указанные производителем: ПГ1 – 30–160 мкг/л; ПГ2 – 3–15 мкг/л; соотношение ПГ1/ПГ2 – 3–20; Г-17

(базальный) – 1–7 пмоль/л. Оценка функционального состояния СОЖ проводилась в соответствии с диагностическими профилями тест-системы «ГастроПанель». Атрофию тела желудка оценивали как тяжелую при уровне ПГ1 ниже 30 мкг/л, как умеренную и слабо выраженную – при ПГ1 31–50 мкг/л. Соотношение ПГ1/ПГ2 (пепсиногеновый тест) ниже 3 учитывали как критерий фундальной атрофии. Высокие значения ПГ2 рассматривали как признак хронического воспаления СОЖ (без атрофии). Антральную атрофию оценивали как выраженную при уровне Г-17 ниже 1 пмоль/л, возможную – при Г-17 выше 1 пмоль/л и ниже 2 пмоль/л. Мультифокальную атрофию определяли в случае низкого ПГ1 (ниже 30 мкг/л) и низкого Г-17 (ниже 1 пмоль/л). Тест на наличие IgG антител к *H.p.* считали положительным при уровне выше 30 ИФЕ.

Статистический анализ включал проверку характера распределения показателей с применением программы SPSS (версия 10.0), анализ числовых характеристик включал средние значения (M) и ошибку средней (m). Для сравнения средних значений применялся критерий Стьюдента («t»), для межгруппового сравнения частотных показателей

использовали критерий Хи-квадрат Пирсона, для анализа статистической значимости различий качественных признаков вычисляли отношение шансов (ОШ) и доверительный интервал (ДИ). Достоверным считался уровень значимости при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Инфицированность персонала в обследованной группе составила 55,6 %, возрастная динамика инфицированности в изученной группе хорошо согласовывалась с результатами других исследований [21, 22]. Максимальный уровень *H.p.*-позитивности наблюдался в возрасте старше 50 лет, в более молодой возрастной категории (до 40 лет) не превышал 40 %, приближаясь к показателям развитых европейских стран (20–40 %) (табл. 1). Антитела к *H.p.* среди женщин выявлялись чаще по сравнению с мужчинами, что, очевидно, связано с возрастным фактором – доля лиц старше 40 лет среди женщин составляла 70 %, среди мужчин 48,6 % и средний возраст в женской группе был статистически значимо выше по сравнению с мужчинами $46,0 \pm 1,4$ лет и $42,0 \pm 0,8$ лет ($p = 0,014$).

Таблица 1

Инфицированность бактерией *H. p.* персонала в исследованной группе

[Table 1]

H. p. infection of the personnel in the studied group

Показатели [Parameters]		n	H.p.+		ОШ (95% ДИ) OR (95% CI)
			n	%	
Вся группа [Whole group]		153	85	55,6	
Пол [Gender]	Мужчины[male]	109	54	49,5	1
	Женщины[female]	44	31	70,5	2,4 (1,9-3,2)
Возрастные группы, лет [Agegroups, years]	30-40	69	25	36,2	1
	41-50	50	35	70,0	4,1 (2,9-5,9)
	51-70	34	25	73,5	4,9 (3,4-7,1)

Значительный прирост инфицированности *H.p.* у мужчин и у женщин наблюдался, начиная с 40 лет (табл. 1). Незначимые различия в инфицированности между мужчинами и женщинами

до 40 лет (ОШ 1,7; 95% ДИ (0,8–3,3)) существенно возрастали с увеличением возраста (ОШ 2,1; 95% ДИ 1,7–2,8).

Таблица 2

Возрастные изменения показателя инфицированности *H.p.* в зависимости от пола

[Table 2]

Age-specific changes in *H.p.* infection depending on gender

Возрастные группы [Age groups]	Мужчины [male] 109 (чел. [ind.])			Женщины [female] (44 чел. [ind.])		
	Кол-во в группе, всего [Number in the group, total]	<i>H.p.</i> +		Кол-во в группе, всего [Number in the group, total]	<i>H.p.</i> +	
		n	%		n	%
30–40 лет [30–40 y]	56	19	35,9	13	6	46,2
ОШ (95% ДИ) [OR (95% CI)]	1			1,7 (0,8–3,3)		
Старше 40 лет [>40 y]	53	35	66,0	31	25	80,6
ОШ (95% ДИ) [OR (95% CI)]	1			2,1 (1,7–2,8)		

Серопозитивность *H.p.* ассоциировалась с более высоким содержанием сывороточных биомаркеров. Средние уровни биомаркеров среди инфицированных значимо превышали количественные показатели в группе *H.p.*-

негативных лиц. При этом уровень ПГ2 повышался в большей степени, чем ПГ1, соотношение пепсиногенов при этом существенно снижалось (табл.3). Повышение содержания биомаркеров при *H.p.*-позитивности может быть

обусловлено рядом факторов, связанных с присутствием микроорганизма: это инициируемое бактерией воспаление СОЖ, действие аммиака, вырабатываемого микроорганизмом, стимулирующего секреторные клетки СОЖ, возможно и прямое стимулирующее действие липополисахаридов бактерии на СОЖ, показанное на экспериментальных моделях. Уменьшение соотношения ПГ1/ПГ2, наблюдаемое у *H.p.*-позитивных лиц (табл. 2), является прогностически неблагоприятным признаком преантероногенных атрофических изменений СОЖ.

Таблица 3

Уровни биомаркеров в зависимости от инфицирования *H.p.*

[Table 3]

Levels of biomarkers depending on <i>H.p.</i> infection			
Показатели [Parameters]	<i>H.p.</i> +	<i>H.p.</i> -	p
	M ± m	M ± m	
ПГ1, мкг/л [PG1, µg/l]	111,2 ± 5,6	91,6 ± 4,8	0,009
ПГ2, мкг/л [PG2, µg/l]	24,0 ± 1,5	13,0 ± 1,2	0.0000
ПГ1/ПГ2 [PG1/PG2]	5,4 ± 0,3	8,2 ± 0,4	0.0000
Г-17, пмоль/л [G-17, pmol/l]	11,8 ± 1,5	6,8 ± 1,3	0.01

В работе [23] показана прямая статистически значимая зависимость воспаления СОЖ в антральном отделе желудка от количества АТ *H.p.*, определены количественные критерии уровня сывороточных антител к *H.p.* для оценки степени гистологической активности воспалительного процесса. Так, нулевой степени активности соответствовал уровень АТ *H.p.* до 77 ИФЕ, 1-й степени – уровень 78-184 ИФЕ, 2-й степени – 185-500 ИФЕ. Используя эти критерии применительно к нашему исследованию, можно выделить подгруппы с разной степенью активности воспаления СОЖ в антральном отделе желудка (табл. 3).

Таблица 4

Распределение инфицированных участников группы в соответствии со степенью воспаления СОЖ (85 чел.) [по 23]

[Table 4]

Distribution of infected members of the group according to the extent of inflammation of the gastric mucosa (85 ind.) [23]					
Показатели [Parameters]	Уровень антител к <i>H.p.</i> , ИФЕ [<i>H. pylori</i> antibody level, EU]				
	30–77		78–184		Выше [Above] 184
Степень активности воспаления [Extent of inflammatory activity]	0		I		II
	n	%	n	%	n %
	12	14,1	22	25,9	51 60,0

В соответствии с этими критериями у 60 % инфицированных работников имело место воспаление II и более степени, со значительными морфологическими изменениями СОЖ, неактивные гастриты нулевой степени без изменений слизистой оболочки встречались в 14 % случаев, в 26 % I степени с незначительными изменениями. Степень колонизации СОЖ в исследованной группе была достаточно высокой – 47 % участников имели уровень АТ *H.p.* (выше 100 ИФЕ), который, согласно [23], соответствовал II или III степени обсемененности (50 и более микробных тел в поле зрения).

Как видим, инфицированность *H.p.* в обследованной группе была достаточно высокой (55,6 %), но в целом сопоставимой с оценками в исследованиях, проведенных среди населения России и Уральского региона – от 60 % до 90 % [24]. По данным недавних популяционных исследований (2016-2018 гг.), в крупных городах России распространенность *H.p.* в среднем не превышала 50 %, а среди жителей старше 60 лет приближалась к 70 % [22]. Как известно, фактором, определяющим распространенность *H.p.* в популяции, является социально-экономический статус в детском возрасте. Основным путем заражения *H.p.* считается внутрисемейная передача [25]. Снижение инфицированности молодого поколения в настоящее время в экономически развитых странах, в большей мере связано с повышением жизненных стандартов, чем с индивидуальным лечением. Максимальная инфицированность приходится на лиц в возрасте 40-60 лет. Более низкие показатели серопозитивности среди лиц 40 лет и моложе в изученной группе, родившихся в 80-х-90-х годах, также могут быть обусловлены повышением жизненных стандартов и улучшением санитарно-гигиенических условий, в детстве. Отсутствие патологических значений АТ *H.p.* среди не леченных лиц может означать, что они не были инфицированы в детстве.

Средние концентрации маркеров в сыворотке крови были сопоставимы с результатами других исследований, выполненных с использованием серологического метода, на разных популяционных и клинических группах (табл. 5) [26]. Отклонения от нормы показателей биомаркеров рассматривали как серологические признаки патологических изменений слизистой оболочки желудка. Наиболее высокой в группе была частота регистрации повышенных уровней ПГ2 и Г-17, прогностических показателей воспалительного процесса в СОЖ, вызванного *H.p.* (41,8 % и 34 % соответственно) [20, 27].

Выделяемые в соответствии с диагностическими профилями тест-системы «ГастроПанель» фенотипы состояния СОЖ были сопоставимы с их морфологической оценкой в обновленной Сиднейской классификации гастритов: неатрофический (поверхностный) гастрит, атрофический гастрит в антральном отделе, атрофический гастрит в теле желудка, атрофический пангастрит (в теле желудка и антральный) [28]. Серонегативность и значения уровня пепсиногенов в диапазоне нормы свидетельствовали об отсутствии морфологических изменений и оценивались как «здоровая СОЖ». Доля обследованных лиц со здоровой СОЖ составила 42,5 %. Серологические признаки патологии СОЖ были выявлены у 57,5 % обследованного персонала (табл. 6).

Концентрация биомаркеров в сыворотке крови и частота отклонений от референтного уровня

Таблица 5

Concentration of biomarkers in blood serum and frequency of deviations from the reference values

[Table 5]

Биомаркеры (референтный диапазон) [Biomarkers (reference range)]	M ± m	Отклонения от референтного диапазона [Deviations from the reference range]					
		Выше верхней границы [Above the upper limit]		Ниже нижней границы [Below the lower limit]		Всего [Total]	
		n	%	n	%	n	%
ПГ1, мкг/л [PG1, µg/l] (30-160)	102,3 ± 3,9	14	9,2	5	3,3	19	12,4
ПГ2, мкг/л [PG2, µg/l] (3-15)	19,0 ± 1,1	64	41,8	0	-	64	41,8
ПГ1/ПГ2 [PG1/[PG2] (3-20)	6,6 ± 0,2	0	-	12	7,8	12	7,8
Г-17 [G-17] (1-7 пмоль/л [pmol/l])	9,7 ± 1,1	52	34,0	9	17,0	69	45,1

Частота выявления признаков патологии СОЖ и возможные риски

Таблица 6

Frequency of identification of the gastric mucosa signs and potential risks

[Table 6]

АТ <i>H.p.</i> [<i>H.p.</i> Ab]	Оценка состояния СОЖ [Assessment of the gastric mucosa condition]	%	Критерии оценки по уровню биомаркеров [Criteria for the assessment according to biomarker levels]	Риски [Risks]
	Атрофия тела желудка [Gastric body atrophy]	7,8	Пепсиноген 1 < 30 мкг/л и/или ПГ1/ПГ2 < 3 [Pepsinogen 1 < 30 µg/l and/or PG1/PG2 < 3]	Рак желудка [Stomach cancer]
	Атрофия антрального отдела [Antral part atrophy]	1,3	Гастрин-17 < 1 пмоль/л [Gastrin-17 < 1 pmol/l]	
	Возможная атрофия антрального отдела [Potential antral part atrophy]	5,2	1 < Гастрин-17 < 2 пмоль/л [1 < Gastrin-17 < 2 pmol/l]	Атрофия антрума (оценка воз- можна после анализа уровня стимулированного Г-17) [Antral atrophy (the assessment is possible after analyzing the level of stimulated G-17)]
<i>H.p.</i> +	Неатрофический <i>H.p.</i> - ассоциированный гастрит, в т.ч.: [Nonatrophic <i>H.p.</i> -associated gastritis including]	43,1	Пепсиноген 1 ≥ 30 мкг/л Пепсиноген 2 ≥ 3 мкг/л ПГ1/ПГ2 ≥ 3 [Pepsinogen 1 ≥ 30 µg/l Pepsinogen 2 ≥ 3 µg/l PG1/PG2 ≥ 3]	Атрофия СОЖ (при отсутствии лечения) [Gastric mucosa atrophy (if not treated)]
	– активный гастрит без атрофии [active gastritis without atrophy]	27,5	Пепсиноген 2 > 15 мкг/л [Pepsinogen 2 > 15 µg/l]	
	– без атрофии с высоким кислотным выбросом (гиперсекреторное со- стояние) [without atrophy with high acid output (hy- persecretory condition)]	9,2	Пепсиноген 1 > 160 мкг/л [Pepsinogen 1 > 160 µg/l]	Эрозивно-язвенное повреждение СОЖ [Erosive and ulcerative lesion of gastric mucosa]

Прогрессивное снижение показателей функциональной активности желудка в результате уменьшения количества желез, свойственных данной зоне желудка, свидетельствует об атрофии СОЖ. В ряде публикаций отмечается четкая корреляция степени атрофии и вероятности малигнизации с уровнем снижения биомаркеров [20, 29]. Низкие показатели ПГ1 (ниже 30 мкг/л) и низкие значения отношения пепсиногенов ПГ1/ПГ2 (ниже 3), являются надежными диагности-

ческими маркерами атрофии слизистой желудка фундальной локализации, Г-17 атрофии антрума. Сниженные значения ПГ1 и/или ПГ1/ПГ2 в изученной группе определялись в 7,8 % случаев, из них в 4,5 % сниженными оказались оба показателя (ПГ1 и ПГ1/ПГ2), что свидетельствует о подтвержденной выраженной фундальной атрофии, в 3,3 % – только ПГ1 (табл. 6). В двух случаях серологические признаки фундальной атрофии сочетались с *H.p.*-негативностью, что воз-

можно при аутоиммунном варианте или в условиях длительно текущей тяжелой атрофии, с выраженной прогрессией в дисплазию с очень высоким риском рака желудка (РЖ) [30, 31]. Низкие уровни диагностического маркера морфофункционального статуса антральной слизистой оболочки, гастрин-17 (Г-17 ниже 1 пмоль/л) были зафиксированы всего в 2-х случаях (1,4 %), возможной антральной атрофии с начальными признаками изменений (Г-17 ≤ 2 пмоль/л) – у 5,2 % обследованных лиц. Суммарно серологические признаки атрофии СОЖ тела и антрального отдела желудка были обнаружены у 14 работников (9,1 %). По общей частоте выявления серологических признаков атрофического гастрита – по низкому уровню ПГ1 (3,3 %) и Г-17 (1,3 %) – показатели в изученной группе не превышали полученных нами ранее среди жителей города, никогда не контактировавших с источниками ионизирующих излучений (4,8 %) [7]. Заметный рост частоты выявления выраженных атрофических изменений слизистой оболочки желудка разной локализации начался после 50 лет независимо от половой принадлежности. Согласно медицинской документации, только 64 % работников с признаками выраженной атрофии СОЖ до тестирования имели гастродуоденальную патологию, преимущественно хронический поверхностный нормо- и гипоацидный гастрит. Остальные участники группы с серологическими признаками атрофии (36 %), гастропатий в анамнезе и гастроэнтерологических клинических проявлений не имели, за медицинской помощью не обращались, т.е. были бессимптомны.

Атрофия СОЖ, как правило, развивается в результате длительно существующего хронического поверхностного гастрита, ассоциированного с инфекцией *H.p.* Хроническое воспаление, индуцируемое *H.p.*, приводит к нарушению секреторной функции желудка разной степени выраженности и развитию хронического гастрита и ассоциированных с ним заболеваний [32]. В современной классификации гастрита подчеркивается важность гастрита, вызванного *H.p.*, как предшественника поражения, которое приводит к развитию язвенной болезни и рака желудка, вне зависимости от наличия симптомов [33]. Признаки неатрофического, ассоциированного с хеликобактерной инфекцией гастрита были обнаружены в 43 % случаев (табл. 6). Количественным серологическим критерием активного воспалительного процесса (активного гастрита) считали превышение верхнего порога референтного диапазона биомаркера пепсиногена 2 [20, 34]. Высокие уровни ПГ2 (> 15 мкг/л) у инфицированных участников обнаруживались в 4 раза чаще (63,6 %) по сравнению с неинфицированными (14,7 %) (ОШ 9,1; 95 % ДИ 5,0-16,6), что указывает на роль бактерии в развитии активного воспалительного процесса в желудке. Возраст на дату обследования в группе с признаками активного воспаления СОЖ, косвенно свидетельствующий о длительности персистенции инфекции, был достоверно выше по сравнению с лицами с нормальными значениями биомаркера ($47,7 \pm 1,4$ и $40,0 \pm 1,6$ лет, $p=0,0007$). Значимый прирост частоты регистрации значений ПГ2 > 15 мкг/л с 45 % до 73 %, наблюдался среди лиц старше 40 лет. Развитие активного воспалительного процесса СОЖ (по маркеру ПГ2) было выявлено у 64 % лиц с неатрофическим гастритом. Несмотря на высокую популяционную инфицированность хеликобактером, заболевания желудка развиваются только в 15-20 % случаев, в остальных случаях имеет место хроническое бессимп-

томное носительство бактерии [35]. По результатам некоторых наблюдений морфологически диагностированный *H.p.*-ассоциированный поверхностный гастрит выявлялся лишь у половины лиц с верифицированным хеликобактериозом [36].

Наряду с выявлением предраковых состояний не менее важной задачей было выделение среди обследованных работников лиц с повышенным риском развития эрозивно-язвенных поражений желудка. Высокий уровень сигнального маркера кислотопродукции ПГ1 (выше 160 мкг/л, в среднем $208,5 \pm 7,7$ мкг/л), свидетельствующий о гиперсекреции соляной кислоты и других агрессивных ульцерогенных факторов регистрировался у 9,2 % участников группы. Около 80 % из них составляли работники старше 40 лет. Почти у всех количественные показатели серологических биомаркеров воспаления существенно превышали верхнюю границу нормы ПГ2 в 2,5-4 раза, а Г-17 в 3 раза, что свидетельствовало об активном воспалительном процессе в слизистой желудка. Наблюдаемые изменения соответствовали картине неатрофического гиперсекреторного *H.p.*-ассоциированного антрального гастрита, обусловленного нарушением регуляции кислотообразования посредством постоянной стимуляции G-клеток и развитием стойкой гипергастринемии. Антральный гастрит и язвенная болезнь 12-перстной кишки рассматриваются как последовательные этапы процесса, запущенного *H.p.* [34]. В выделенной нами группе с гиперсекреторным состоянием СОЖ, согласно медицинскому анамнезу заболевания желудка (хронические гастриты, гастродуодениты, язвенные болезни желудка и двенадцатиперстной кишки), были зарегистрированы в 50 % случаев, около трети участников предъявляли диспептические и ацидические жалобы, у остальных (20 %) каких-либо симптомов, свидетельствующих о заболевании, не проявлялось.

В исследуемой нами группе около 90 % работников были наняты на тритиевое производство до 2000 года. В соответствии с данными, приводимыми в [17], до 2000 года эффективная доза β – излучения трития у работников этого производства могла, в зависимости от выполняемой работы, достигать 150–700 мЗв в период 1964–1966 гг., и к 1999 году была снижена до 4 мЗв/год. Следовательно, в относительно ранние годы работы тритиевого производства, уровни β – излучения трития вполне могли достигать уровней, превышающих разрешенные действующими нормами радиационной безопасности.

К сожалению, индивидуальные оценки доз в настоящее время недоступны, и провести прямое сопоставление дозы излучения и потенциального эффекта мы не можем.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено:

1. Распространенность серологических признаков патологических изменений и степень инфицированности слизистой оболочки желудка *H.p.* в группе персонала, контактирующего с соединениями трития, соответствовала показателям отечественных исследований, выполненных с использованием технологии «ГастроПанель».
2. По общей частоте выявления серологических признаков атрофического гастрита показатели в изученной группе не превышали полученных нами ранее среди жителей города, никогда не контактировавших с источниками ионизирующих излучений.
3. Серологические признаки патологических изменений в состоянии слизистой оболочки желудка выявлены у 57,5 % работников: в 9 % – признаки предракового состояния желудка, атрофического гастрита, в 43 % –

неатрофического *H.p.*-ассоциированного гастрита, в 9,3 % – гиперсекреторного неатрофического гастрита с высоким кислотным выбросом.

4. Распространенность инфекции *H.p.* в обследованной группе составила 55,6 %. Степень инфицирования у женщин была выше по сравнению с мужчинами и прогрессивно возрастала с 36 % у 30–40-летних до 73,5 % в возрасте старше 50 лет.

На основании полученных результатов выделена группа лиц с высоким риском рака желудка или язвенной болезни (18,3 %), нуждающихся в дальнейшем наблюдении с использованием базовых эндоскопических и морфологических методов и принятии медицинских решений, из которых около трети (36 % – с признаками атрофии, 20 % – с признаками язвенного поражения слизистой желудка) были бессимптомны, заболеваний желудка в анамнезе не имели и за медицинской помощью не обращались.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Поволоцкая С.В. – концепция, дизайн статьи, обсуждение результатов, написание статьи.

Сокольников С.С. – обработка данных, дизайн статьи, обсуждение и анализ результатов работы, структурирование полученных данных.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы (бюджет).

Литература

- Бекенова Ф.К., Кызымбет П.К., Клодзинский А.А., Байдулин С.А. Оценка относительных рисков соматических заболеваний у рабочих ураноперерабатывающего завода г. Степногорска // Радиация и риск. 2007. Т. 16, № 2–4. С. 61–71.
- Туков А.Р., Гнеушева Г.И., Суворова Ю.В., Дикарев В.А. Заболеваемость неонкологическими болезнями лиц, подвергавшихся профессиональному радиационному воздействию // Медицина экстремальных ситуаций. 2013. № 3 (45). С. 14–21.
- Sokolnikov M., Preston D., Gilbert E. et al. Radiation effects on mortality from solid cancers other than lung, liver and bone cancer in the Mayak Worker Cohort: 1948–2008 // PLoS ONE. 2015. Vol. 10, No. 2. P. 117784.
- Иванова О.В. Эндоскопическая диагностика заболеваний желудочно-кишечного тракта у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС в отдаленном периоде: дис... канд. мед. наук. М., 2005. 111 с.
- Жунтова Е.С., Азизова Т.В., Григорьева Е.С. Показатели заболеваемости раком желудка в когорте работников предприятия атомной промышленности // Вопросы радиационной безопасности. 2022. № 3. С. 80–87.
- Саблина А.О., Алексанин С.С. Атрофический гастрит у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции в отдаленном периоде // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2020. № 1. С. 36–46.
- Рабинович Е.И., Обеснюк В.Ф., Поволоцкая С.В. и др. Оценка влияния факторов риска на развитие атрофического гастрита у работников предприятия атомной промышленности. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. № 5. С. 31–39.
- Рабинович Е.И., Обеснюк В.Ф., Поволоцкая С.В. Атрофический гастрит у лиц, подвергшихся радиационному воздействию вследствие проживания на территориях, загрязненных радионуклидами // Радиобиология: актуальные проблемы: Сборник трудов международной научной конференции. Гомель, 2018. С. 136–139.
- Кашин С.В., Кайбышева В.О., Крайнова Е.А. и др. Основные положения новых европейских рекомендаций «Принципы диагностики, лечения наблюдения пациентов с предраковыми состояниями и изменениями желудка». Значение рекомендаций для российских специалистов // Доказательная гастроэнтерология. 2020. № 3. С. 16–30.
- Соловьев В.Ю. Концепция выделения групп повышенного риска среди персонала с опасными условиями труда // Анализ риска здоровью. 2013. № 3. С. 27–33.
- Аклеев А.В., Азизова Т.В., Алексахин Р.М. и др. Итоги 62-й сессии научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН (Вена, 1–5 июня 2015 г.) Документ R.709 «Биологические эффекты облучения от отдельных инкорпорированных радионуклидов» // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. № 1. С. 60–72.
- Калистратова В.С., Кочетков О.А., Кабанов Д.И. Метаболизм и биологическое действие соединений трития (история вопроса и современное состояние проблемы) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2014. № 2. С. 54–67.
- Chao T.C., Wang C.C., Li C., Tung C.J. Cellular- and microdosimetry of heterogeneously distributed tritium // International Journal of Radiation Biology. 2012. Vol. 88, No (1–2). P. 151–157.
- Balonov M.I., Muksinova K.N., Mushkacheva G.S. Tritium Radiobiological Effects in Mammals. Review of Experiments of the Last Decade in Russia // Health Physics. 1993. Vol. 65, No 6. P. 713–726.
- Третьяков Ф.Д., Кондратенко Е.П., Колесников А.С. Основные итоги изучения условий труда в производстве трития // «Гигиенические, дозиметрические и медико-биологические аспекты отдаленных эффектов хронического облучения»: Труды и материалы Юбилейной научной конференции 50 лет ЮУрИБФ. Озерск, Челябинская обл., 2003. С. 57–60.
- Снигирева Г.П., Хаймович Т.И., Богомазова А.Н. и др. Цитогенетическое обследование профессионалов-атомщиков, подвергавшихся хроническому воздействию β -излучения трития // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. № 1. С. 60–66.
- Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Тритий в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период с 2017 по 2019 г. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 102–110. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-102-110.
- Tawn E.J., Curwen G., Riddell A.E. Chromosome aberration in workers occupationally exposed to tritium // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38, No 9. P. 9–16.
- Korzenova I.B., Kostuyk S.V., Ershova L.S. et al. Human circulating plasma DNA significantly decreases while lymphocyte DNA damage increases under chronic occupational exposure to low-dose gamma-neutron and tritium beta-radiation // Mutation Research. 2015. No 779. P. 1–15.
- Di Mario F., Moussa A.M., Caruana P. et al. “Serological biopsy” in first-degree relatives of patients with gastric cancer affected by *Helicobacter pylori* infection // Scandinavian Journal of Gastroenterology. 2003. Vol. 38. P. 1223–1227.
- Курилович С.А., Решетников О.В. Эпидемиологические исследования в гастроэнтерологии: многолетний сибирский опыт изучения *Helicobacter pylori* и ассоциированных заболеваний // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2015. № 3. С. 4–10.
- Плавник Р.Г., Бакунина Н.В., Мареева Д.В., Бордин Д.С. Эпидемиология *Helicobacter pylori*: клинико-лабораторные параллели // Эффективная фармакотерапия. 2019. Т. 15, № 36. С. 16–20.
- Максименко Г.В., Чернявская Г.М., Белобородова Э.И. и др. Диагностика неатрофического гастрита у больных язвенной болезнью двенадцатиперстной кишки в сочетании с бронхиальной астмой с помощью тест-системы «Гастропанель» // Бюллетень сибирской медицины. 2012. № 1. С. 185–190.

24. Бордин Д.С., Кузнецова Е.С., Стаувер Е.Е. и др. Эпидемиология инфекции *Helicobacter pylori* в Российской Федерации с 1990 по 2023 г.: систематический обзор // Русский Медицинский Журнал. Медицинское обозрение. 2024. № 8(5). С. 260–267. DOI: 10.32364/2587-6821-2024-8-5-3.
25. Yokota S., Konno M., Fujiwara S.I. et al. Intra familiar, preferentially mother-to-child and intra spousal, *Helicobacter pylori* infection in Japan determined by multi locus sequence typing and random amplified polymorphic DNA fingerprinting // *Helicobacter*. 2015. Vol. 20, No 5. P. 334–342.
26. Белковец А.В., Курилович С.А., Решетников О.В. и др. Неинвазивная диагностика фенотипа гастрита в клинической практике: анализ первой тысячи исследований // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2015. № 3. С. 26–30.
27. Sipponen P., Kekki M., Haapakoski J. et al. Gastric cancer risk in chronic atrophic gastritis: statistical calculation of cross-sectional data // *International Journal of Cancer*. 1985. Vol. 35. P. 173–177.
28. Dixon M.F., Genta R.M., Yardley J. et al. Classification and grading of gastritis. The updated Sydney System. International Workshop on the Histopathology of Gastritis, Houston 1994 // *The American Journal of Surgical Pathology*. 1996. Vol. 20 (10). P. 1161–1181.
29. Пасечников В.Д., Котелевец С.М., Чуков С.З., Мостовов А.Н. Морфофункциональные проявления атрофии слизистой оболочки желудка при *Helicobacter pylori* – ассоциированном гастрите // Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. 2004. № 1. С. 26–32.
30. Kokkola A., Kosunen T.U., Puolakkainen R. et al. Spontaneous disappearance of *Helicobacter pylori* antibodies in patients with advanced atrophic corpus gastritis // *Journal of pathology, microbiology and immunology*. 2003. V. 111. P. 619–624.
31. Щелоченков С.В., Бордин Д.С., Чеботарева М.В. и др. Аутоиммунный гастрит: от диагностики к эффективной терапии // Русский медицинский журнал. Медицинское обозрение. 2024. Т. 8, № 5. С. 299–306. DOI: 10.32364/2587-6821-2024-8-5-9.26
32. Correa P. Is gastric cancer preventable? // *Gut*. 2004. Vol. 53, N 9. P. 1217–1219. DOI: 10.1136/gut.2004.039834.
33. Sugano K., Tack J., Kuipers E.J. et al. Kyoto global consensus report on *Helicobacter pylori* gastritis // *Gut*. 2015. Vol. 64, No 9. P. 1353–1367.
34. Пепсиноген II. Официальный сайт компании Helix: <https://helix.ru/kb/item/08-099> (Дата обращения: 20.09.2024).
35. Malfertheiner P., Megraud F., O'Morain C.A. et al. Management of *Helicobacter pylori* infection – the Maastricht V Florence Consensus Report // *Gut*. 2017. Vol. 66. P. 6–30. DOI: 10.1136/gutjnl.2016.312288.
36. Roman L., Lukyanchuk R., Sablin O. et al. Prevalence of *H. pylori* and atrophic gastritis in population-based screening with serum biomarker panel (GastroPanel) in St. Petersburg // *Anticancer Research*. 2016. Vol. 36, No 8. P. 4129–4138.

Поступила: 09.10.2024

Поволоцкая Светлана Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории радиационной биохимии, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID: 0000-0002-0324-3257

Сокольников Софья Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационной биохимии, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456780, Озерск, Озерское шоссе, 19; E-mail: sokolnikova_s@subi.su

ORCID: 0000-0003-4861-5568

Для цитирования: Поволоцкая С.В., Сокольников С.С. Состояние слизистой оболочки желудка у персонала, контактирующего с соединениями трития // *Радиационная гигиена*. 2025. Т. 18, № 1. С. 49–58. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-49-58

State of the gastric mucosa in workers contacting with tritium compounds

Svetlana V. Povolotskaya, Sofia S. Sokolnikova

Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical-Biological Agency, Ozyorsk, Russia

*The goal of the work is an assessment of the gastric mucosa condition in the personnel of the nuclear enterprise contacting with tritium compounds in the frame of a standard production cycle. The work includes results of the serological stomach screening of the workers exposed to chronic tritium β -radiation in permissible doses. A noninvasive method for quantitative determination of key biomarkers of the structure and functional state of the stomach in blood serum – pepsinogens (PG1 and PG2), gastrin-17 (G-17), and the extent of *Helicobacter pylori* infection of the stomach (anti-*Helicobacter pylori* IgG) using the test systems GastroPanel, was used to detect signs of pathological changes in the stomach. It was found that*

Sofia S. Sokolnikova

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, 456780, Russia; E-mail: sokolnikova_s@subi.su

Helicobacter pylori infection of the personnel depended on the age at the examination date and gender, and in general it was 55.6 %, serological signs of abnormalities in the gastric mucosa condition were revealed for 57.5 % workers, 9 % – atrophic gastritis (precancerous state of the stomach), 43 % – nonatrophic *Helicobacter pylori*-associated gastritis (mucosal atrophy risk), 9.3 % – hypersecretory nonatrophic gastritis with high acid output (gastric ulcer risk). A marked increase in the frequency of detection of significant atrophic changes in the gastric mucosa started after 50 years. Frequency of serological atrophic and nonatrophic signs in the studied group did not exceed the values obtained earlier in the group of residents of the city who had never been in contact with the sources of ionizing radiation. About a third of the workers with high risks of severe gastropathology (36 % – with atrophy signs, 20 % – with signs of erosive and ulcerative lesion of the gastric mucosa) did not have any symptoms, gastroduodenal diseases in past medical history, did not seek medical help. It is concluded that *Helicobacter pylori* infection of the stomach and incidence of the signs of pathological changes in the gastric mucosa condition in the group of the personnel working with tritium compounds correspond to the values from the latest Russian studies. 18.3 percent of the workers are in a group of increased risk of stomach cancer and ulcer disease and needs further monitoring using basic endoscopic and morphological methods and medical decisions.

Key words: personnel, tritium, stomach, prognostic biomarkers, *Helicobacter pylori*, GastroPanel, risk group.

Authors' personal contribution

Povolotskaya S.V. – concept and design of the paper, discussion of findings, writing the paper.

Sokolnikova S.S. – data processing, design of the paper, discussion and analysis of findings, structuring of the received data.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

The work has been completed within the framework of the federal target program (budget).

References

1. Bekenova FK, Kyzymbet PK, Klodzinskiy AA, Baydurin SA. Relative risk assessment of somatic diseases in workers of the uranium-processing plant of Stepnogorsk city. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2007;16(2–4): 61–71. (In Russian).
2. Tukov AR, Gneusheva GI, Suvorova YuV, Dikarev VA. Incidence of non-oncological diseases of individuals exposed to occupational radiation exposure. *Meditsina ekstremaalnykh situatsiy = Emergency Medicine Journal*. 2013;3(45): 14–21. (In Russian).
3. Sokolnikov M, Preston D, Gilbert E, Schonfeld S, Koshurnikova N. Radiation effects on mortality from solid cancers other than lung, liver and bone cancer in the Mayak Worker Cohort: 1948–2008. *PloS ONE*. 2015;10(2): 117784.
4. Ivanova OV. Endoscopic diagnosis of gastrointestinal diseases in liquidators of Chernobyl nuclear power plant accident consequences in the long-term period: dis... kand.med.nauk - Thesis ... Candidate of Medical Science. Moscow; 2005. 111 p. (In Russian).
5. Zhuntova ES, Azizova TV, Grigorieva ES. Incidence rate of stomach cancer in the cohort of workers of the nuclear industry enterprise. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2022;3: 80–87. (In Russian).
6. Sablina AO, Aleksanin SS. Atrophic gastritis in liquidators of Chernobyl nuclear power plant accident consequences in the long-term period. *Mediko-biologicheskie i sotsialno-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh = Biomedical and psychosocial safety issues in emergency*. 2020;1: 36–46. (In Russian).
7. Rabinovich EI, Obesnyuk VF, Povolotskaya SV, Sokolova SN, Turdakova VA. Assessment of risk factor effect on atrophic gastritis development in workers of the nuclear industry enterprise. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2015;5: 31–39. (In Russian).
8. Rabinovich EI, Obesnyuk VF, Povolotskaya SV. Atrophic gastritis in individuals exposed to radiation due to living on the radionuclide polluted areas. *Radiobiologiya: aktualnye problemy: Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii = Radiobiology: current issues: proceedings of the international scientific conference*. Gomel; 2018: 136–139. (In Russian).
9. Kashin SV, Kaibysheva VO, Krainova EA, Ivanikov IO, Koterov AN. Fundamental provisions of the new European recommendations «Principles of diagnosis, treatment and follow-up of patients with precancerous state and changes in the stomach». The importance of recommendations for Russian specialists. *Dokazatel'naya gastroenterologiya = Evidence-based Gastroenterology*. 2020;3: 16–30. (In Russian).
10. Soloviev VYu. The concept of identifying high risk groups among the personnel with hazardous working conditions. *Analiz riska zdorov'yu = Health Risk Analysis*. 2013;3: 27–33. (In Russian).
11. Akleev AV, Azizova TV, Aleksakhin RM, Ivanov VK, Koterov AN, Kryshev AI, et al. Results of the 62nd Session of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (Vienna, 1–5 June, 2015). Document R.709 «Biological effects of radiation from individual incorporated radionuclides». *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2016;1: 60–72 (In Russian).
12. Kalistratova VS, Kochetkov OA, Kabanov DI. Metabolism and biological effects of tritium compounds (historical background and status update on the problem). *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2014;2: 54–67. (In Russian).
13. Chao TC, Wang CC, Li C, Tung CJ. Cellular- and microdosimetry of heterogeneously distributed tritium. *International Journal of Radiation Biology*. 2012;88(1–2): 151–157.
14. Balonov MI, Muksinova KN, Mushkacheva GS. Tritium Radiobiological Effects in Mammals. Review of Experiments of the Last Decade in Russia. *Health Physics*. 1993;65(6): 713–726.
15. Tretyakov FD, Kondratenko EP, Kolesnikov AS. Main results of research of working conditions at tritium production facilities. *Gigienicheskie, dozimetricheskie i mediko-biologicheskie aspekty otdalennykh jeffektov hronicheskogo oblucheniya: Trudy i materialy Yubileinoi nauchnoy konferentsii 50 let JuUrIBF = Hygienic, dosimetry and medical and biological aspects of late effects of chronic exposure»: Proceedings and material of the Jubilee scientific conference – 50 years of SUBI*. Ozyorsk, Chelyabinsk region; 2003. P. 57–60. (In Russian).
16. Snigireva GP, Haimovich TI, Bogomazova AN, Gorbunova IN, Nagiba VI, Nikanorova EA, et al. Cytogenetic examination of nuclear professionals exposed to chronic tritium β -radiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2009;1: 60–66. (In Russian).
17. Vostrotnin VV, Yanov AYU, Finashov LV. Tritium in the urine of Mayak PA workers in the period from 2017 to 2019. *Radiatsionnaya gigiyena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 102–110. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-102-110.

18. Tawn EJ, Curwen G, Riddell AE. Chromosome aberration in workers occupationally exposed to tritium. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38(9): 9–16.
19. Korzeneva IB, Kostuyk SV, Ershova LS, Osipov AN, Zhuravleva VF, Pankratova GV, et al. Human circulating plasma DNA significantly decreases while lymphocyte DNA damage increases under chronic occupational exposure to low-dose gamma-neutron and tritium beta-radiation. *Mutation Research*. 2015;779: 1–15.
20. Di Mario F, Moussa AM, Caruana P, Merli R, Cavallaro LG, Cavestro GM, et al. «Serological biopsy» in first-degree relatives of patients with gastric cancer affected by *Helicobacter pylori* infection. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*. 2003;38: 1223–1227.
21. Kurilovich SA, Reshetnikov OV. Epidemiological studies in the gastroenterology: long-term Siberian experience of studying *Helicobacter pylori* and associated diseases. *Eksperimentalnaya i klinicheskaya gastroenterologiya = Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2015;3: 4–10. (In Russian).
22. Plavnik RG, Bakunina NV, Mareeva DV, Bordin DS. *Helicobacter pylori* epidemiology: clinical and laboratory parallels. *Effektivnaya farmakoterapiya = Effective Pharmacotherapy*. 2019;15(36): 16–20. (In Russian).
23. Maksimenko GV, Chernyavskaya GM, Beloborodova EI, Ustyuzhanina EA, Kalacheva TP. Diagnosis of nonatrophic gastritis in patients with duodenal ulcer disease in combination with bronchial asthma using the «Gastropanel» test. *Byulleten sibirskoy meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*. 2012;1: 185–190. (In Russian).
24. Bordin DS, Kuznetsova ES, Stauver EE, Nikolskaya KA, Chebotarova MV. Epidemiology of *Helicobacter pylori* infection in the Russian Federation from 1990 to 2023: systematic review. *Russkiy Meditsinskiy Zhurnal. Meditsinskoe obozrenie = Russian Medical Journal. Medical Review*. 2024;8(5): 260–267. (In Russian). DOI: 10.32364/2587-6821-2024-8-5-3.
25. Yokota S, Konno M, Fujiwara SI, Toita N, Takahashi M, Yamamoto S, et al. Intra familiar, preferentially mother-to-child and intra spousal, *Helicobacter pylori* infection in Japans determined by multi locus sequence typing and random amplified polymorphic DNA fingerprinting. *Helicobacter*. 2015;20(5): 334–342.
26. Belkovets AV, Kurilovich SA, Reshetnikov OV, Ragino Yul, Shcherbakova LV. Non-invasive diagnostics of the gastritis phenotype in clinical practice: analysis of the first thousand studies. *Eksperimentalnaya i klinicheskaya gastroenterologiya = Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2015;3: 26–30 (In Russian).
27. Sipponen P, Kekki M, Haapakoski J, Ihamaki T, Siurala M. Gastric cancer risk in chronic atrophic gastritis: statistical calculation of cross-sectional data. *International Journal of Cancer*. 1985;35: 173–177.
28. Dixon MF, Genta RM, Yardley J, Correa P. Classification and grading of gastritis. The updated Sydney System. International Workshop on the Histopathology of Gastritis, Houston 1994. *The American Journal of Surgical Pathology*. 1996;20(10): 1161–1181.
29. Pasechnikov VD, Kotelevets SM, Chukov SZ, Mostovov AN. Morphofunctional manifestations of gastric mucosa atrophy at *Helicobacter pylori* (associated gastritis). *Rossiyskiy Zhurnal Gastroenterologii, Gepatologii, Koloproktologii = Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*. 2004;1: 26–32. (In Russian).
30. Kokkola A, Kosunen TU, Puolakkainen R, Sipponen P, Harkonen M, Laxen F, et al. Spontaneous disappearance of *Helicobacter pylori* antibodies in patients with advanced atrophic corpus gastritis. *Journal of pathology, microbiology and immunology*. 2003;111: 619–624.
31. Shchelochkov SV, Bordin DS, Chebotareva MV, Lisovskiy MA, Gubanov AV, Guskova ON. Autoimmune gastritis: from diagnostics to effective therapy. *Russkiy Meditsinskiy Zhurnal. Meditsinskoe obozrenie = Russian Medical Journal. Medical Review*. 2024;8(5): 299–306. (In Russian). DOI: 10.32364/2587-6821-2024-8-5-9. 26.
32. Correa P. Is gastric cancer preventable? *Gut*. 2004;53(9): 1217–1219. DOI: 10.1136/gut.2004.039834.
33. Sugano K, Tack J, Kuipers EJ, Graham DY, Graham DY, EL-Omar EM, et al. Kyoto global consensus report on *Helicobacter pylori* gastritis. *Gut*. 2015 64(9): 1353–1367.
34. Pepsinogen II. The official website of the Helix company. – Available from: <https://helix.ru/kb/item/08-099> (Accessed: 20.09.2024).
35. Malfertheiner P, Megraud F, O'Morain CA, Gisbert JP, Kuipers EJ, Axon AT, et al. Management of *Helicobacter pylori* infection – the Maastricht V Florence Consensus Report. *Gut*. 2017;66: 6–30. DOI:10.1136/gutjnl.2016.312288.
36. Roman L, Lukyanchuk R, Sablin O, Araslanova EI, Eklund C, Hendolin P, et al. Prevalence of H. pylori and atrophic gastritis in population-based screening with serum biomarker panel (GastroPanel) in St. Petersburg. *Anticancer Research*. 2016;36(8): 4129–4138.

Received: October 09, 2024

Svetlana V. Povolotskaya – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Radiation Biochemistry, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical-Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0002-0324-3257

For correspondence: Sofia S. Sokolnikova – Junior Researcher, Laboratory of Radiation Biochemistry, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical-Biological Agency (456780, Ozyorskoe Shosse, 19, Ozyorsk, Russia; E-mail: sokolnikova_s@subi.su)

ORCID: 0000-0003-4861-5568

For citation: Povolotskaya S.V., Sokolnikova S.S. State of the gastric mucosa in workers contacting with tritium compounds. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 49–58. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-49-58

Защитные мероприятия для отдельных категорий лиц при контакте с пациентом после радионуклидной терапии

Л.А. Чипига^{1,2,3}, А.В. Лихачева^{1,4}, И.А. Звонова¹, А.В. Водоватов^{1,5}, О.Ю. Тоскин⁶,
А.А. Сапельников⁶, К.С. Величина⁷, А.С. Терентьева⁷, А.А. Станжевский²

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

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

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

⁴ Городская больница № 40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Акционерное общество «Европейский медицинский центр», Москва, Россия

⁷ Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр экспертиз безопасности ТУК», Санкт-Петербург, Россия

Пациенты, проходящие радионуклидную терапию с радиофармацевтическими препаратами, могут становиться источником внешнего облучения для окружающих людей. Выписка таких пациентов требует строгого соблюдения требований к радиационной безопасности, чтобы минимизировать воздействие на окружающих лиц, особенно детей и беременных женщин. Целью работы было определение защитных мероприятий по ограничению времени контакта пациента после радионуклидной терапии с окружающими лицами и разработка рекомендаций, позволяющих снизить дозы окружающих лиц. Для анализа были рассмотрены различные сценарии: контакт с детьми и совместный сон с партнерами. Определение необходимых временных ограничений было проведено с использованием литературных данных и расчетов методом Монте-Карло на различном расстоянии от пациента. Результаты показали, что при проведении радионуклидной терапии ²²⁵Ac, ²²³Ra, ⁸⁹Sr и ⁹⁰Y доза облучения окружающих от контакта с пациентом не превысит ограничения в 0,3 мЗв даже при отсутствии ограничительных мер. Однако для пациентов, прошедших терапию с ¹³¹I, ¹⁷⁷Lu и ¹⁵³Sm, требуются ограничительные меры по сокращению времени близкого контакта с детьми и совместного сна с партнерами. Предложенные меры обеспечивают радиационную безопасность людей, контактирующих с пациентом, ограничивая их облучение пределами доз для населения, и помогают пациентам сохранять социальные контакты, что важно для их восстановления.

Ключевые слова: ядерная медицина, радионуклидная терапия, радиофармацевтический лекарственный препарат, радиологические критерии выписки, радиационная безопасность.

Введение

Радионуклидная терапия (РНТ) является одним из наиболее быстро и широко развивающихся методов лечения онкологических заболеваний [1, 2]. При РНТ пациент может становиться источником внешнего облучения для окружающих лиц, что наиболее характерно для радиофармацевтических лекарственных препаратов (РФЛП), меченных радионуклидами, которые испускают гамма-

кванты (например, ¹³¹I, ¹⁷⁷Lu). Выписка пациентов после РНТ с такими РФЛП требует применения особых мер по радиационной защите окружающих пациента лиц [3, 4].

Радиационная безопасность окружающих лиц, контактирующих с пациентом после РНТ, обеспечивается путем выписки пациента из медицинской организации при соблюдении установленных радиологических критериев выписки¹ [5-8]. Выполнение критериев выписки пациентов обеспечивает уровень излучения от пациента (мощность

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности. [Norms of the Radiation Safety NRB-99/2009 (In Russ.)]; СанПиН 2.6.1.2368-08. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников. М.: Роспотребнадзор, 2008. 99 с. [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2368-08. Hygienic requirements for radiation safety during radiation therapy using open radionuclide sources. Moscow: Rosпотребнадзор; 2008. 99 p. (In Russ.)]

Чипига Лариса Александровна

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

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

дозы на расстоянии 1 метр от пациента при выписке из отделения РНТ), при котором эффективная доза у критической группы лиц не превысит годовой предел дозы для населения. Рекомендации МАГАТЭ и МКРЗ предлагают рассматривать пациента после РНТ как один из источников облучения для лиц из категории населения и для целей радиационной защиты предлагают использовать долю от предела дозы для населения – граничную дозу. В качестве значения граничной дозы для защиты лиц из населения в некоторых странах принимается 0,3 мЗв [3,5,9] в России в качестве защитной меры используется годовой предел дозы для населения от техногенных источников 1 мЗв. Родственники, проживающие с пациентом, а также лица, осуществляющих уход за пациентом, получают непосредственную пользу от лечения пациента и для них применяется значение граничной дозы равное 5 мЗв [3, 5].

Методика определения критериев выписки нацелена на защиту лиц, которые находятся в постоянном (ежедневном) контакте с пациентом. Для расчётов ежедневный контакт моделируется пребыванием на расстоянии 1 метр при времени контакта: 7 часов в день для взрослых лиц, которые обеспечивают уход за пациентом и 3-4 часа в день для лиц из категории населения, в том числе детей, контактирующих с пациентом после РНТ [5,8].

Однако в некоторых ситуациях возможно меньшее расстояние от пациента: например, при контакте с маленьким ребенком, когда он находится на руках, или в ситуации, когда партнер спит в одной кровати с пациентом. Сокращение расстояния от пациента будет приводить к росту мощности дозы облучения партнера или ребенка. Таким образом, для отдельных категорий лиц годовая эффективная доза от контактов с пациентом после процедуры РНТ может превысить установленный предел дозы. В таком случае должны применяться дополнительные меры, ограничивающие контакты пациентов с этими категориями людей.

Цель исследования – определение защитных мероприятий по ограничению времени контакта пациента после РНТ с окружающими лицами и разработка рекомендаций, позволяющих снизить дозы окружающих лиц.

Материалы и методы

В работе были рассмотрены контакты пациента после РНТ с $Na^{131}I$ при тиреотоксикозе и раке щитовидной железы, ^{131}I -МИБГ, ^{153}Sm -оксабифор, ^{177}Lu -ПСМА-617, ^{177}Lu -ДОТАТАТЕ, ^{225}Ac -ПСМА-617, ^{225}Ac -ДОТАТАТЕ, ^{223}Ra -дихлорид, ^{89}Sr -дихлорид и ^{90}Y -зевалин со следующими категориями лиц:

- маленькие дети (от новорожденных до 3-х-летнего возраста), которых пациент после РНТ может держать на руках (близкий контакт – 5 см от пациента);
- партнеры, которые спят в одной кровати (10 см от пациента по 8 часов в сутки).

Для оценки эффективности ограничительных мероприятий были проведены оценки доз облучения от пациента за два периода: доза, полученная за период ограничений ($E_{огр}$) и период после снятия ограничений ($E_{ост}$) с использованием формул (1) и (2), соответственно:

$$E_{огр} = 34,6 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{E}(t_1) \cdot OF_{огр} \cdot A_0 \cdot \sum_i a_i T_{effi} \times \left(e^{-\ln 2 \frac{t_1}{T_{effi}}} - e^{-\ln 2 \frac{t_2}{T_{effi}}} \right), \quad (1)$$

$$E_{ост} = 34,6 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{E}(t_2) \cdot OF_{ост} \cdot A_0 \cdot \sum_i a_i T_{effi}, \quad (2)$$

где $\dot{E}$ – мощность эффективной дозы на соответствующем расстоянии от пациента, нормированная на 1 МБк, мкЗв·ч⁻¹·МБк⁻¹ (табл. 1);

t_1 – время от введения РФЛП до выписки пациента, сут. (табл. 1);

t_2 – время от введения РФЛП до снятия ограничений, сут.;

$OF_{огр}$ – доля времени, которое партнер проводит в кровати с пациентом на период ограничений (0 – 0 часов в день для партнеров, которые спят в одной кровати);

$OF_{ост}$ – доля времени контакта с пациентом после снятия ограничений (0,15 – 3,5 часа в день для контакта с детьми; 0,33 – 8 часов в день для партнеров, которые спят в одной кровати);

a_i – доля РФЛП с эффективным периодом полувыведения T_{effi} ;

T_{effi} – эффективный период полувыведения выведения i -й фазы РФЛП, сут.

Ограничительные мероприятия для защиты детей и партнеров были оценены исходя из того, что суммарная доза, полученная за время контакта с пациентом за оба рассмотренных периода, не должна превышать 0,3 мЗв [3, 4, 9].

В предыдущих работах авторов [8,10,11] на основании данных о выведении РФЛП и радиоактивном распаде радионуклидов были определены эффективные периоды полувыведения РФЛП. Для определения времени выписки пациентов после РНТ использовали следующие критерии выписки пациентов:

- 3 мкЗв/ч на расстоянии 1 метр от пациента для РФЛП на основе ^{225}Ac , ^{223}Ra , ^{89}Sr , ^{90}Y согласно СанПиН 2.6.1.2368–08;
- 20 мкЗв/ч на расстоянии 1 метр от пациента для РФЛП на основе ^{131}I согласно НРБ-99/2009;
- 29 мкЗв/ч на расстоянии 1 метр от пациента для РФЛП на основе ^{177}Lu [8];
- 100 мкЗв/ч на расстоянии 1 метр от пациента для РФЛП на основе ^{153}Sm согласно НРБ-99/2009.

Значения мощности эффективной дозы от пациента после РНТ были определены на основании литературных данных [12-16] с учетом коэффициентов перехода от $H_p(10)$ к эффективной дозе [17], дополнительно методом Монте Карло с помощью программы MCNP были просчитаны мощности эффективной дозы на разных расстояниях от тела пациента с радионуклидом. Параметры в формулах (1) и (2), используемые при расчетах представлены в таблице 1.

Результаты

Значения допустимого времени контакта пациента после РНТ с детьми (маленькие дети, которых пациент после РНТ может держать на руках – 5 см от пациента) в зависимости от времени, прошедшего после выписки пациента, представлены в таблице 2.

Таблица 1

Параметры в формулах (1) и (2), используемые при расчетах

[Table 1

Parameters were used in the equations (1) and (2)]

РФЛП [Radiopharmaceutical]	A_0 , МБк [MBq]	a_1	T_{eff1} , сут. [day]	a_2	T_{eff2} , сут. [day]	t_1 , сут. [day]	Мощность эффективной дозы $\dot{E}$ на разном расстоянии от пациента, мкЗв·ч ⁻¹ ·МБк ⁻¹ [Effective dose rate at different dis- tant from the patient, $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}$]		
							1 метр [1 m]	5 см [5 cm]	10 см [10 cm]
Na ¹³¹ I-тиреотоксикоз [Na ¹³¹ I-thyrototoxicosis]	600	0,2	0,333	0,8	7,5	1,8	0,046	4,5	1,3
Na ¹³¹ I-рак ЩЖ [Na ¹³¹ I-thyroid cancer]	7500	0,9	0,333	0,1	7,5	5,8	0,046	4,5	1,3
¹³¹ I-МИБГ [¹³¹ I-mIBG]	7500	0,37	0,121	0,63	1,88	6,3	0,046	4,5	1,3
¹⁷⁷ Lu-ПСМА-617 [¹⁷⁷ Lu-PSMA-617]	7500	0,5	0,071	0,5	2,5	0,25	0,006	0,067	0,058
²²⁵ Ac-ПСМА-617 [²²⁵ Ac-PSMA-617]	6	0,5	0,072	0,5	2,9	0	0,06	0,35	0,3
¹⁷⁷ Lu-ДОТА-ТАТЕ [¹⁷⁷ Lu-DOTATATE]	7500	0,5	0,18	0,5	4,2	0,25	0,006	0,067	0,058
²²⁵ Ac-ДОТА-ТАТЕ [²²⁵ Ac-DOTATATE]	6	0,5	0,18	0,5	5,3	0	0,06	0,35	0,3
¹⁵³ Sm-оксабифор [¹⁵³ Sm-oxabifor]	2800	0,8	0,64	0,2	1,9	0	0,017	0,53	0,24
⁸⁹ Sr-дихлорид [⁸⁹ Sr-dichloride]	150	0,33	1	0,67	5,8	0	<0,001	0,004	0,001
²²³ Ra-дихлорид [²²³ Ra-dichloride]	4	1	1,17	-	-	0	0,09	0,56	0,49
⁹⁰ Y-зевалин [⁹⁰ Y-zevalin]	1200	1	2,67	-	-	0	<0,001	0,01	0,01

Таблица 2

Время, которое нужно выждать пациенту перед тем, как держать на руках ребенка
(время после выписки до начала контакта ($t_2 - t_1$)) при разном времени контакта

[Table 2

The time a patient needs to wait before holding a baby and different contact times]

Период ограничений [Restriction period]	OF _{огр}		Время после выписки до начала контакта ($t_2 - t_1$), сут [Time after release before contact, day]
	доля времени [fraction of time]	мин в день [minutes a day]	
Na ¹³¹ I-тиреотоксикоз (выписка через 44 часа после введения РФЛП) [Na ¹³¹ I-thyrotoxicosis (release after 44 hours after radiopharmaceutical administration)]			
1 неделя [1 week]	0,069	100	56
	0,049	71	55
	0,031	44	54
	0,014	20	53

Период ограничений [Restriction period]	OF _{ср}		Время после выписки до начала контакта ($t_2 - t_1$), сут [Time after release before contact, day]
	доля времени [fraction of time]	мин в день [minutes a day]	
2 недели [2 week]	0,04	58	51
	0,032	46	50
	0,024	34	49
	0,017	24	48
3 недели [3 week]	0,017	25	44
	0,014	20	43
	0,010	15	42
	0,007	10	41
4 недели [4 week]	0,015	22	40
	0,012	18	39
	0,01	15	38
	0,008	12	37
Na ¹³¹ I-рак ЩЖ (выписка через 140 часов после введения РФЛП) [Na ¹³¹ I-thyroid cancer (release after 140 hours after radiopharmaceutical administration)]			
1 неделя [1 week]	0,073	105	57
	0,052	75	56
	0,033	48	55
	0,015	22	54
2 недели [2 week]	0,033	48	51
	0,025	36	50
	0,018	26	49
	0,011	16	48
3 недели [3 week]	0,018	26	45
	0,014	21	44
	0,011	16	43
	0,008	11	42
4 недели [4 week]	0,015	22	41
	0,013	19	40
	0,011	16	39
	0,009	13	38
¹³¹ I-МИБГ (выписка через 152 часа после введения РФЛП) [¹³¹ I-mIBG (release after 152 hours after radiopharmaceutical administration)]			
1 неделя [1 week]	0,056	80	9
	0,035	50	8
	0,02	29	7
	0,01	14	6
2 недели [2 week]	0,029	42	7
	0,019	28	6
	0,013	19	5
	0,009	13	4
3 недели [3 week]	0,03	43	7
	0,02	29	6
	0,014	20	5
	0,009	14	4

Период ограничений [Restriction period]	OF _{ор}		Время после выписки до начала контакта ($t_2 - t_1$), сут [Time after release before contact, day]
	доля времени [fraction of time]	мин в день [minutes a day]	
4 недели [4 week]	0,020	29	6
	0,014	20	5
	0,01	14	4
	0,006	9	3
¹⁷⁷ Lu-ПСМА-617 (выписка через 6 часов после введения РФЛП) [¹⁷⁷ Lu-PSMA-617 (release after 6 hours after radiopharmaceutical administration)]			
1 неделя [1 week]	0,066	95	6
	0,044	63	5
	0,027	39	4
	0,014	20	3
2 недели [2 week]	0,042	61	4
	0,031	45	3
	0,023	33	2
	0,017	24	1
3 недели [3 week]	0,033	48	3
	0,025	36	2
	0,019	27	1
	0,014	20	0
¹⁷⁷ Lu-ДОТАТАТ (выписка через 6 часов после введения РФЛП) [¹⁷⁷ Lu-DOTATATE (release after 6 hours after radiopharmaceutical administration)]			
1 неделя [1 week]	0,084	120	15
	0,060	87	14
	0,041	59	13
	0,024	34	12
2 недели [2 week]	0,034	49	10
	0,026	38	9
	0,019	28	8
	0,014	20	7
3 недели [3 week]	0,028	41	8
	0,02	34	7
	0,019	28	6
	0,015	22	5
4 недели [4 week]	0,026	38	7
	0,022	31	6
	0,018	26	5
	0,015	22	4

Период ограничений [Restriction period]	OF _{орг}		Время после выписки до начала контакта ($t_2 - t_1$), сут [Time after release before contact, day]
	доля времени [fraction of time]	мин в день [minutes a day]	
¹⁵³ Sm-оксабифор (выписка сразу после введения РФЛП) [¹⁵³ Sm-oxabifor (release immediately after radiopharmaceutical administration)]			
1 неделя [1 week]	0,081	117	5
	0,051	73	4
	0,029	42	3
	0,015	21	2
2 недели [2 week]	0,058	83	4
	0,038	54	3
	0,022	32	2
	0,012	18	1
3 недели [3 week]	0,058	84	4
	0,038	55	3
	0,023	33	2
	0,012	18	1
4 недели [4 week]	0,038	55	3
	0,023	33	2
	0,012	18	1
	0,007	10	0
²²⁵ Ac (выписка сразу после введения РФЛП) [²²⁵ Ac (release immediately after radiopharmaceutical administration)]			
—*	0,15	216	0
²²³ Ra (выписка сразу после введения РФЛП) [²²³ Ra (release immediately after radiopharmaceutical administration)]			
—*	0,15	216	0
⁸⁹ Sr-дихлорид (выписка сразу после введения РФЛП) [⁸⁹ Sr-dichloride (release immediately after radiopharmaceutical administration)]			
—*	0,15	216	0
⁹⁰ Y-зевалин (выписка сразу после введения РФЛП) [⁹⁰ Y-zevalin (release immediately after radiopharmaceutical administration)]			
—*	0,15	216	0

*эффективная доза у детей на руках у пациентов после РНТ с ²²⁵Ac, ²²³Ra, ⁸⁹Sr и ⁹⁰Y даже без ограничительных мероприятий не превышала 0,3 мЗв [effective dose of children in the arms of patients after radiopharmaceutical therapy with ²²⁵Ac, ²²³Ra, ⁸⁹Sr and ⁹⁰Y, even without precautions, did not exceed 0.3 mSv].

Полученные результаты показали, что дозы у детей от пациентов после РНТ с ²²⁵Ac, ²²³Ra, ⁸⁹Sr и ⁹⁰Y не превысят 0,3 мЗв даже в случае ежедневного близкого контакта в течение 3,5 часов каждый день. Однако ограничительные мероприятия по контакту с детьми на близком расстоянии необходимы пациентам после с РНТ с радионуклидами ¹³¹I, ¹⁷⁷Lu и ¹⁵³Sm. При этом для радиационной защиты ребенка необходимо запретить пациенту держать на руках ребенка в течение первых дней после введения РФЛП. Чем дольше будет бесконтактный период, тем больше времени в дальнейшем можно будет контактировать с ребенком на постоянной основе. Однако оптимальное решение существенно зависит от семейных обстоятельств, привязанности пациента и ребенка, необходимости ухода за ним, и прочих, трудно планируемых особенностей семьи. Стоит отметить, что после снятия ограничений время контакта (менее 0,5 часа)

может оказаться недостаточным для выполнения ежедневных функций и систематически превышать. Поэтому в качестве необходимого в работе рассматривалось время ежедневного контакта с ребенком не менее 30 минут. Таким образом, авторами были выбраны следующие ограничения, которые могут быть рекомендованы пациенту по близкому контакту с ребенком в течение:

- первых семи недель после проведения РНТ с Na¹³¹I и в дальнейшие две недели держать ребенка на руках не более 35 минут в день;
- первой недели после выписки из отделения РНТ с ¹³¹I-МИБГ и в следующую неделю держать ребенка на руках не более 30 минут в день;
- первой недели после выписки из отделения РНТ с ¹⁷⁷Lu-ПСМА-617 или ¹⁷⁷Lu-ДОТА-TATE и в следующие три недели держать ребенка на руках не более 35 минут в день;

– первых двух дней после выписки из отделения РНТ с ^{153}Sm -оксабифор и в следующие 14 дней держать ребенка на руках не более 30 минут в день.

Продолжительность ограничений для партнеров спать в одной кровати с пациентом после РНТ представлены в таблице 3.

Полученные результаты показали, что дозы у близких людей, которые спят в одной кровати с пациентом после РНТ с ^{225}Ac и ^{223}Ra , не превысят 0,3 мЗв, отсутствует необходимость введения ограничительных мероприятий для радиационной защиты партнеров пациента. Однако ограничительные мероприятия необходимы для пациентов после РНТ с ^{131}I , ^{177}Lu , ^{153}Sm – спать раздельно от пациента в течение нескольких недель.

Обсуждение

Важным этапом при выписке пациента является его информирование по вопросам радиационной безопасности и соблюдению мер предосторожности для снижения возможного облучения окружающих лиц.

Одной из критических групп, подверженных высоким дозам облучения от пациентов, являются дети, при контакте с которыми нет возможности выдержать дистанцию. При сокращении расстояния от пациента растёт мощность дозы облучения ребенка, что требует сокращения времени контактирования с пациентом. В первое время после РНТ мощность дозы от пациента наиболее высокая, поэтому в работе были определены промежутки времени, в течение которого стоит воздержаться от близкого контакта с детьми (держать на руках и обнимать), а также ограничение по времени контакта в дальнейшем. Рекомендованные меры предосторожности представлены в таблице 3. Выполнение предложенных ограничений позволит снизить дозу у ребенка до 0,3 мЗв [3,4,9]. Несмотря на то, что в Российской Федерации отсутствует оптимизация посредством применения граничной дозы использование 0,3 мЗв для ограничения дозы у лиц из категории населения, контактирующих с пациентом на постоянной основе, применение данного ограничения является приемлемым и обоснованным по следующим причинам:

- гармонизация с международными подходами [3, 4, 9];
- планируемое введение концепции граничной дозы в закон «О радиационной безопасности населения»;
- возможность проведения в течение года нескольких курсов РНТ пациенту и связанная с этим вероятность получения близкими людьми годовой эффективной дозы техногенного облучения за счет совместного проживания и постоянного контакта с пациентом, превышающей основной предел дозы для населения;
- обеспечение радиационной защиты с учетом облучения лиц за счет других источников ионизирующего излучения.

К другой группе лиц, которая подвержена высоким дозам облучения от пациента после РНТ, относятся партнеры, которые могут спать в одной кровати с пациентом, а также контактировать с пациентом в дневное время. Годовая эффективная доза техногенного облучения партнера за счет облучения от пациента после РНТ во время сна может превысить предел дозы для населения, если не соблюдать строгие временные ограничения. Это существенно с учетом дополнительного контакта с пациентом в дневное время. Чаще всего партнер осуществляет уход и поддержку пациента в течение дня и облучается от пациента на протяжении

Таблица 3

Время, которое нужно выждать пациенту после РНТ и его партнеру для того, чтобы спать в одной кровати

[Table 3]

The time a patient and his or her partner need to wait after radiopharmaceutical therapy to sleep in the same bed]

РФЛП [Radiopharmaceutical]	Время выписки пациента после введения РФЛП (t_1), ч [Patient release time after admin- istration, h]	Время после выписки до начала контакта ($t_2 - t_1$), сут [Time after release before contact, day]
$\text{Na } ^{131}\text{I}$ -тиреотоксикоз [$\text{Na } ^{131}\text{I}$ -thyrotoxicosis]	44	56
$\text{Na } ^{131}\text{I}$ -пак ЩЖ [$\text{Na } ^{131}\text{I}$ -thyroid cancer]	140	61
^{131}I -МИБГ [^{131}I -mIBG]	152	17
^{177}Lu -ПСМА-617 [^{177}Lu -PSMA-617]	6	11
^{177}Lu -ДОТА-ТАТЕ [^{177}Lu -DOTATATE]	6	22
^{153}Sm -оксабифор [^{153}Sm -oxabifor]	0	7
^{225}Ac	0	—*
^{223}Ra	0	—*
^{89}Sr -дихлорид [^{89}Sr -dichloride]	0	—*
^{90}Y -зевалин [^{90}Y -zevalin]	0	—*

*эффективная доза у партнеров, которые спят в одной кровати с пациентом после РНТ с ^{225}Ac , ^{223}Ra , ^{89}Sr и ^{90}Y , даже без ограничительных мероприятий не превышала 0,3 мЗв. [the effective dose of partners sleeping in the same bed with a patient after radiopharmaceutical therapy with ^{225}Ac , ^{223}Ra , ^{89}Sr and ^{90}Y , even without precautions, did not exceed 0.3 mSv]

этого времени. Согласно требованиям НРБ-99/2009 и рекомендациями МАГАТЭ и МКРЗ, доза у этой категории лиц не должна превышать 5 мЗв за год [3,4]. Существующие критерии выписки пациентов определены с учетом непревышения 1 мЗв при ежедневном контакте с пациентом 3-4 часа в день, что обеспечивает с запасом непревышение дозы в 5 мЗв для лиц, оказывающих уход и поддержку пациенту. При соблюдении ограничений, представленных в таблице 4, доза у партнера за счет сна в одной кровати с пациентом не превысит 0,3 мЗв и доза от контакта с пациентом не превысит 5 мЗв с учетом обеспечения ухода за пациентом.

Кроме ограничений контактов по времени, пациенту рекомендуется соблюдать меры предосторожности, касающиеся использования предметов гигиены и посуды в течение первых недель, чтобы исключить возможность контакта окружающих лиц с биологическими жидкостями пациента (слюна, моча), которые могут содержать радионуклид.

Таблица 4

Меры предосторожности для пациента после РНТ с различными РФЛП

[Table 4]

Precautions for the patient after radiopharmaceutical therapy with different radiopharmaceuticals]

РФЛП [Radiopharmaceutical]	Не держать на руках и не обнимать детей после выписки [Do not hold and hug children after release]	Держать на руках детей не более 30-35 минут в день [Hold children in the arms for no more than 30-35 minutes a day]	Спать одному и воздерживаться от интимных контактов [Sleeping alone and avoiding sexual contacts]
	Длительность ограничительного периода [Duration of the restrictive period]		
Na ¹³¹ I-тиреотоксикоз [Na ¹³¹ I-thyrototoxicosis]	7 недель [7 weeks]	2 недели [2 weeks]	2 месяца [2 months]
Na ¹³¹ I-рак ЩЖ [Na ¹³¹ I-thyroid cancer]	7 недель [7 weeks]	2 недели [2 weeks]	2 месяца [2 months]
¹³¹ I-МИБГ [¹³¹ I-mIBG]	1 неделя [1 week]	1 неделя [1 week]	2,5 недели [2.5 weeks]
¹⁷⁷ Lu-ПСМА-617 [¹⁷⁷ Lu-PSMA-617]	1 неделя [1 week]	1 неделя [1 week]	2 недели [2 weeks]
¹⁷⁷ Lu-ДОТА-TATE [¹⁷⁷ Lu-DOTATATE]	1 неделя [1 week]	1 неделя [1 week]	3 недели [3 weeks]
¹⁵³ Sm-оксабифор [¹⁵³ Sm-oxabifor]	2 дня [2 days]	2 недели [2 weeks]	1 неделя [1 week]
²²⁵ Ac, ²²³ Ra, ⁸⁹ Sr, ⁹⁰ Y	—*	—*	—*

*не требуются дополнительные ограничительные мероприятия для контакта с окружающими [additional precautions for contact with others are not required]

Заключение

На основании проведенных в работе расчетов были предложены рекомендации для пациентов после проведения РНТ при контакте с окружающими лицами на близком расстоянии. Соблюдение мер предосторожности и ограничение времени контактов является основополагающим при обеспечении радиационной защиты окружающих пациента лиц, однако пациентам не стоит полностью прекращать общение, поскольку взаимодействие с близкими людьми может являться важным аспектом при восстановлении пациента после терапии. При этом необходимо заботиться о радиационной безопасности близких людей и соблюдать рекомендации, полученные при выписке. Рекомендации для разных РФЛП отличаются в зависимости от физических характеристик радионуклида, входящего в состав РФЛП, а также фармакокинетики самого РФЛП.

При этом необходимо помнить о важности информирования пациента и его близких о мерах предосторожности для защиты себя и своих близких в форме письменной инструкции. Выполнение рекомендованных мер предосторожности обеспечит радиационную защиту окружающих лиц при контакте с пациентом после прохождения РНТ и не превышение пределов доз у лиц, контактирующих с пациентом.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Чипига Л.А. – научное руководство исследованием, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, обработка и анализ полученных результатов, обсуждение результатов исследования, написание текста статьи, редактирование текста статьи.

Лихачева А.В. – поиск и анализ литературы, проведение расчетов, обработка и анализ полученных результатов, написание текста статьи.

Звонова И.А. – поиск и анализ литературы, обсуждение результатов исследования.

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

Тоскин О.Ю. – анализ и интерпретация результатов обсуждения результатов исследования.

Сапельников А.А. – анализ и интерпретация результатов обсуждения результатов исследования.

Величина К.С. – проведение расчетов, редактирование текста статьи, перевод.

Терентьева А.С. – проведение расчетов, редактирование текста статьи, перевод.

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

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора «Разработка и научное обоснование комплекса мер по обеспечению радиационной защиты в ядерной медицине».

Литература

1. Evaluation of Medical Exposure to Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 Report Volume I. Annex A.
2. Scott A.M., Zeglis B.M., Lapi S.E. et al. Trends in nuclear medicine and the radiopharmaceutical sciences in oncology: workforce

- challenges and training in the age of theranostics // *Lancet Oncology*. 2024. Vol. 25, No 6. P. e250-e259. DOI: 10.1016/S1470-2045(24)00037-8. Erratum in: *Lancet Oncology*. 2024. Vol. 25, No 8. e336 p. DOI: 10.1016/S1470-2045(24)00378-4.
3. International Commission on Radiological Protection. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication 94 // *Annals of the ICRP*. 2004. Vol. 34, No (2).
 4. International Atomic Energy Agency. Release of Patients After Radionuclide Therapy. Safety Reports Series No. 63. IAEA. Vienna, 2009.
 5. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А. Радиологические критерии выписки пациента из клиники после радионуклидной терапии или брахитерапии с имплантацией закрытых источников // *Радиационная гигиена*. 2009. Т. 2, № 4. С. 5-9.
 6. Звонова И.А., Балонов М.И., Голиков В.Ю. Критерии освобождения пациентов, прошедших радионуклидную терапию, и критерии пересечения ими государственной границы Российской Федерации // *Дозиметрия радиационной защиты*. 2011. Т. 147, № 1-2. С. 254-257. DOI: 10.1093/rpd/ncr308.
 7. Наркевич Б.Я., Лысак Ю.В. Обеспечение радиационной безопасности при амбулаторном режиме применения терапевтических радиофармпрепаратов // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2015. Т. 60, № 4. С. 27-35.
 8. Чипига Л.А., Звонова И.А., Водоватов А.В. и др. Совершенствование подхода к определению радиологических критериев выписки пациентов после радионуклидной терапии // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 2. С. 19-31. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-19-31.
 9. Mattsson S., Hoeschen C. *Radiation Protection in Nuclear Medicine*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 159 p.
 10. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Звонова И.А. и др. Обращение с биологическими отходами пациентов после проведения радионуклидной терапии // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 2. С. 19-30. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30.
 11. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Петрякова А.В. и др. Обоснование дифференцированного подхода к обращению с биологическими отходами пациентов в подразделениях ядерной медицины // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 4. С. 34-44. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-34-44.
 12. Demir M., Abuqbeith M., Uslu-Beşli L. et al. Evaluation of radiation safety in ¹⁷⁷Lu-PSMA therapy and development of outpatient treatment protocol // *Journal of Radiological Protection*. 2016. Vol. 36, No. 2. P. 269-278. DOI: 10.1088/0952-4746/36/2/269.
 13. Wanke C., Pinkert J., Szermerski B., Geworski L. Assessment of the radiation exposure of relatives and caregivers of patients treated with Ra-223 - Results of a German multicenter study // *Zeitschrift für Medizinische Physik*. 2021. Vol. 31, No 1. 58-64. DOI: 10.1016/j.zemedi.2020.09.002.
 14. Dauer L.T., Williamson M.J., Humm J. et al. Radiation safety considerations for the use of ²²³RaCl₂ DE in men with castration-resistant prostate cancer // *Health Physics*. 2014. Vol. 106, No 4. P. 494-504. DOI: 10.1097/HP.0b013e3182a82b37.
 15. Serencsits B., Chu B.P., Pandit-Taskar N. et al. Radiation Safety Considerations and Clinical Advantages of α-Emitting Therapy Radionuclides // *Journal of Nuclear Medicine Technology*. 2022. Vol. 50, No 1. P. 10-16. DOI: 10.2967/jnmt.121.262294.
 16. NCRP report № 155. Management of Radionuclide Therapy Patients. National Council on Radiation Protection and Measurements, New York, 2007.
 17. International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116 // *Annals of the ICRP*. 2010. Vol. 40, No (2-5).

Поступила: 03.02.2025

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com

Лихачева Анастасия Валерьевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; инженер по радиационной безопасности Городской больницы № 40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

Звонова Ирина Александровна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

Тоскин Олег Юрьевич – руководитель отдела радиационной безопасности АО «Европейский медицинский центр», Москва, Россия

Сапельников Александр Александрович – инженер отдела радиационной безопасности АО «Европейский медицинский центр», Москва, Россия

Величина Кристина Сергеевна – инженер, общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр экспертиз безопасности ТУК», Санкт-Петербург, Россия

Терентьева Анастасия Сергеевна – инженер, общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр экспертиз безопасности ТУК», Санкт-Петербург, Россия

Станжевский Андрей Алексеевич – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Чипига Л.А., Лихачева А.В., Звонова И.А., Водоватов А.В., Тоскин О.Ю., Сапельников А.А., Величкина К.С., Терентьева А.С., Станжевский А.А. Защитные мероприятия для отдельных категорий лиц при контакте с пациентом после радионуклидной терапии // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 59–69. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-59-69

Precautions for certain categories of individuals in contact with a patient after radionuclide therapy

Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Anastasia V. Likhacheva^{1,4}, Irina A. Zvonova¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,5}, Oleg Yu. Toskin⁶, Aleksandr A. Sapelnikov⁶, Kristina S. Velichkina⁷, Anastasia S. Terenteva⁷, Andrey A. Stanzhevsky²

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

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

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

⁴ The City Hospital No 40 of the Kurortny District, Saint Petersburg, Russia

⁵ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

⁶ European Medical Center, Moscow, Russia

⁷ Technical Scientific Centre for Safety Assessment of RM Packages, Saint Petersburg, Russia

Patients undergoing radionuclide therapy with radiopharmaceuticals may become a radiation source of external exposure. Release of the patients requires strict abidance of radiation safety regulations to minimize exposure to individuals in contact with patient, especially children and pregnant women. The purpose of the current study was to determine precautions for patients after radionuclide therapy to limit the contact time with others and to develop guidelines to reduce doses to individuals in contact with patient. Two cases were considered for analysis: contact with young children and co-sleeping with partners. Determination of the necessary time limitations was performed using open-assessed publications and Monte Carlo calculations at different distances from the patient. The results showed that radionuclide therapy with ²²⁵Ac, ²²³Ra, ⁸⁹Sr, and ⁹⁰Y would not exceed the limit of 0.3 mSv to individuals in contact with patient after radionuclide therapy, even in the case of no precautions. However, for patients with ¹³¹I, ¹⁷⁷Lu and ¹⁵³Sm, precautions to limit the time of close contact with children and co-sleeping with partners are required. The suggested precautions ensure the radiation safety of individuals in contact with the patient after radionuclide therapy by limiting the exposure limits and allow patients to maintain social contacts, which is important for their rehabilitation.

Key words: nuclear medicine, radionuclide therapy, radiopharmaceutical, patient release criteria, radiation safety.

Authors' personal contribution

Chipiga L.A. – scientific management of the study, development of the study design, search and analysis of literature, calculations, formulation of the scientific conjectures, processing and analysis of results, writing the text of the article.

Likhacheva A.V – search and analysis of literature, calculations, processing and analysis of results, discussion of the results, editing the text of the article.

Zvonova I.A. – search and analysis of literature, discussion of the results.

Vodovатов A.V. – analysis and interpretation of the results, discussion of the results, editing the text of the article.

Toskin O.Yu. – analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Sapelnikov A.A. – analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Velichkina K.S. – calculations, editing the text of the article, translation.

Terenteva A.S. – calculations, editing the text of the article, translation.

Stanzhevsky A.A. – search and analysis of literature, discussion of the results, editing the text of the article.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interest.

Larisa A. Chipiga

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

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

Sources of funding

The work was performed as a part of the program of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing «Development and scientific justification of a set of measures to ensure radiation protection in nuclear medicine».

References

1. Evaluation of Medical Exposure to Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 Report Volume I. Annex A.
2. Scott AM, Zeglis BM, Lapi SE, Scott PJH, Windhorst AD, Abdel-Wahab M, et al. Trends in nuclear medicine and the radiopharmaceutical sciences in oncology: workforce challenges and training in the age of theranostics. *Lancet Oncology*. 2024;25(6):e250-e259. DOI: 10.1016/S1470-2045(24)00037-8. Erratum in: *Lancet Oncology*. 2024;25(8):e336. DOI: 10.1016/S1470-2045(24)00378-4.
3. International Commission on Radiological Protection. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication 94. *Annals of the ICRP*. 2004;34(2).
4. International Atomic Energy Agency. Release of Patients After Radionuclide Therapy. Safety Reports Series No. 63. IAEA. Vienna; 2009.
5. Balonov MI, Golikov VYu, Zvonova IA. Radiological Criteria for Patient Release from Clinic after Radionuclide Therapy of Brachytherapy with Sealed Source Implantation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 5-9. (In Russian).
6. Release criteria for patients having undergone radionuclide therapy and criteria or their crossing the state border of the Russian Federation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011;147(1-2): 254-257. DOI: 10.1093/rpd/ncr308.
7. Narkevich BYa, Lysak YuV. Radiation Safety in the Outpatient Regimen for the Use of Therapeutic Radiopharmaceuticals. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2015;60(4): 27-35. (In Russian).
8. Chipiga LA, Zvonova IA, Vodovatov AV, Petryakova AV, Stanzhevsky AA, Vazhenina DA, et al. Improvement of the approach to definition of patient release criteria after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 19-31. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-19-31.
9. Mattsson S, Hoeschen C. Radiation Protection in Nuclear Medicine. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013. 159 p.
10. Chipiga LA, Vodovatov AV, Zvonova IA, Stanzhevsky AA, Petryakova AV, Anokina EE, et al. Management of biological waste of patients after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(2): 19-30. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30.
11. Chipiga LA, Vodovatov AV, Petryakova AV, Zvonova IA, Stanzhevsky AA, Maistrenko DN, et al. Justification of differential approach to management of patient biological waste in nuclear medicine departments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 34-44. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-34-44.
12. Demir M, Abuqbeitah M, Uslu-Besli L, Yildirim Ö, Yeyin N, Çavdar İ, et al. Evaluation of radiation safety in 177Lu-PSMA therapy and development of outpatient treatment protocol. *Journal of Radiological Protection*. 2016;36(2): 269-278. DOI: 10.1088/0952-4746/36/2/269.
13. Wanke C, Pinkert J, Szermerski B, Geworski L. Assessment of the radiation exposure of relatives and caregivers of patients treated with Ra-223 - Results of a German multicenter study. *Zeitschrift für Medizinische Physik*. 2021;31(1): 58-64. DOI: 10.1016/j.zemedi.2020.09.002.
14. Dauer LT, Williamson MJ, Humm J, O'Donoghue J, Ghani R, Awadallah R, et al. Radiation safety considerations for the use of ²²³RaCl₂ DE in men with castration-resistant prostate cancer. *Health Physics*. 2014;106(4): 494-504. DOI: 10.1097/HP.0b013e3182a82b37.
15. Serencsits B, Chu BP, Pandit-Taskar N, McDevitt MR, Dauer LT. Radiation Safety Considerations and Clinical Advantages of α-Emitting Therapy Radionuclides. *Journal of Nuclear Medicine Technology*. 2022;50(1): 10-16. DOI: 10.2967/jnmt.121.262294.
16. NCRP report № 155. Management of Radionuclide Therapy Patients. National Council on Radiation Protection and Measurements, New York; 2007.
17. International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116. *Annals of the ICRP*. 2010;40(2-5).

Received: February 03, 2025

For correspondence: Larisa A. Chipiga – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Research Fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; Docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com)

Anastasia V. Likhacheva – Acting Junior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Radiation Safety Engineer, Saint Petersburg City Hospital No. 40, Saint Petersburg, Russia

Irina A. Zvonova – Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher of Protection Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

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

Oleg Yu. Toskin – Head of Radiation Safety Department, JSC «European Medical Center», Moscow, Russia

Aleksandr A. Sapelnikov – Radiation Safety Engineer, JSC «European Medical Center», Moscow, Russia

Christina S. Velichkina – Engineer, LLC «Technical Scientific Centre for Safety Assessment of RM Packages», Saint Petersburg, Russia

Anastasia S. Terenteva – Engineer, LLC «Technical Scientific Centre for Safety Assessment of RM Packages», Saint Petersburg, Russia

Andrey A. Stanzhevsky – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director for Research, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

For citation: Chipiga L.A., Likhacheva A.V., Zvonova I.A., Vodovatov A.V., Toskin O.Yu., Sapelnikov A.A., Velichkina K.S., Terenteva A.S., Stanzhevsky A.A. Precautions for certain categories of individuals in contact with a patient after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 59–69. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-59-69.

Зависимость коэффициентов перехода к эффективной дозе от веса пациентов, подвергающихся рутинным рентгенологическим исследованиям

В.Ю. Голиков¹, А.В. Водоватов^{1,2}, Д.Д. Лаврешов³

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 Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

На основе информации в отношении параметров проведения рутинных рентгенологических процедур были рассчитаны значения коэффициентов перехода к эффективной дозе у пациента различного веса. Численные значения коэффициентов перехода соответствуют значениям эффективной дозы при проведении данного рентгенографического исследования, полностью определяемого набором технических, геометрических и дозиметрических параметров, нормированным на значение поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от фокуса трубки (K_e , мкЗв/мГр), либо на значение произведения дозы на площадь, измеренное за время проведения исследования (K_d , мкЗв/(сГр·см²)). Показано, что коэффициенты K_e обладают большим относительным разбросом своих значений, чем коэффициенты K_d . Внутри каждой весовой группы пациентов значение коэффициента K_d для пациента стандартного веса $K_d(W^{cm})$, может быть преобразовано к значению для пациента другого веса $K_d(W^{pac})$. Кроме того, экстраполяция расчетных значений K_d до веса младенцев значительно ниже веса 2,6 кг (вплоть до веса 0,6 кг), т.е. для недоношенных младенцев, дает удовлетворительные оценки значения K_d .

Ключевые слова: рентгенологические исследования, коэффициенты перехода, эффективная доза, пациенты.

Введение

При проведении медицинского исследования с использованием ионизирующего излучения необходимо оценить значение эффективной дозы у пациента¹. Эффективная доза – величина, используемая в качестве меры риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности² [1]. Определение значения эффективной дозы на практике представляет значительные сложности, так как она не может быть измерена и требует проведения сложных расчетов.

Исходные данные для расчета эффективной дозы облучения пациентов при проведении рутинных рентгенологических исследований должны включать:

- технические параметры проведения исследования (напряжение на аноде рентгеновской трубки, толщина и материал фильтра);

- геометрические характеристики рентгенологического исследования (область исследования, размеры поля облучения, геометрия облучения);

- дозиметрические характеристики рентгенологического исследования (радиационный выход рентгеновского излучателя и экспозиция (количество электричества) или значение произведения дозы на площадь (ПДП), измеренное с помощью проходной ионизационной камеры).

В работе [2] на основе опубликованных литературных данных нами были разработаны и представлены зависимости коэффициентов перехода от ПДП к эффективной дозе от веса пациентов для ряда рентгенологических исследований.

Цель исследования – более тщательное изучение аналогичной зависимости для рутинных рентгенологических исследований трех областей тела: черепа и шеи, грудной клетки и брюшной полости и таза.

¹МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [MU 2.6.1.2944-11. Control of the effective patient doses from medical X-ray examinations. M. Rosпотребнадzor. 2011. 40 p. (In Russ.)]

²Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534 [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 № 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration №. 14534. (In Russ.)]

Голиков Владислав Юрьевич

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

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

Задачи исследования

1. Подтверждение установленной в [2] весовой зависимости коэффициентов перехода.

2. Оценка разброса значений коэффициента перехода с целью установления возможности использования его среднего значения, например, в качестве репрезентативной величины для оценки риска проведения медицинских процедур в данной области тела.

Были рассчитаны значения коэффициентов перехода, позволяющие определить эффективные дозы облучения пациентов различного возраста для рентгенографических процедур, выполняемых в областях черепа и шеи, грудной клетки, и брюшной полости и таза. Численные значения коэффициентов перехода соответствуют значениям эффективной дозы при проведении данного рентгенографического исследования, полностью определяемого набором технических, геометрических и дозиметрических параметров, нормированным на значение поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от фокуса трубки (K_e , мкЗв/мГр), либо на значение ПДП, измеренное за время проведения исследования (K_d , мкЗв/(сГр·см²)).

Материалы и методы

Значения эффективных доз рассчитывались с помощью компьютерной программы EDEREX (Effective Dose Estimation at Roentgen Examinations) [3]. Расчеты эффективной дозы в соответствии с ее определением (Публикация № 60 МКРЗ) проводились для условного человека, имеющего полный набор мужских и женских органов. В качестве расчетных моделей тела пациента были использованы антропоморфные гетерогенные фантомы тела взрослого человека, а также детей в возрасте: новорожденного, 1, 5, 10 и 15 лет, рекомендованные в качестве «стандартных» для проведения такого рода расчетов (табл. 1) [4].

Таблица 1

Параметры расчетной модели «стандартного» человека

[Table 1]

Parameters of the calculation model of a “standard” person

Возраст, лет [Age, years]	Вес, кг [Weight, kg]	Рост, см [Height, cm]	Размеры торса, см [Torso dimensions, cm]	
			Передне-задний [Anterior-posterior]	Боковой [Lateral]
0	3,5	51,5	9,8	12,7
1	9,3	75	13	17,6
5	19	109	15	22,9
10	31,9	138,6	16,8	27,8
15	54,4	164	19,6	34,5
Взрослый [Adult]	71,1	174	20	40

Значения коэффициентов перехода K_e и K_d для рентгенографических процедур рассчитывались для следующих возрастных (весовых) групп пациентов: – от новорожденного до полугода; – от полугода до двух лет; – от двух лет до семи лет; – от семи лет до двенадцати лет; – от двенадцати лет до семнадцати лет; семнадцать лет и старше (взрослые).

Использовали следующие проекции процедур (см. рис. 1): – передне-задняя; – задне-передняя; – левая боковая; – правая боковая.

Размеры полей рентгеновского излучения в зависимости от возраста (веса) пациента варьировались от 5×8 см до 40×35 см, а напряжения на аноде рентгеновской трубки – от 50 до 120 кВ. При этом, в расчетах использовалось одно значение расстояния от фокуса трубки-приемника изображения (РИП=100 см) и одно значение фильтрации рентгеновского излучения (3,5 мм Al).



Рис. 1. Проекция проведения процедур: передне-задняя проекция; задне-передняя проекция; левая боковая проекция; правая боковая проекция

[Fig. 1. Projections for performing procedures: anterior-posterior projection; posterior-anterior projection; left lateral projection; right lateral projection]

В списке исследований, проводимых в областях черепа и шеи, грудной клетки, брюшной полости и таза для каждого возраста (веса) пациента было 38, 31 и 34 наименований соответственно. Это наибольшее количество исследований в этих областях тела пациента, известное нам из литературы. Так, например, в МУ 2.6.1.2944-11 для взрослого пациента указано только 11 наименований исследований для грудной клетки. Такое большое количество исследований позволяет оценить разброс значений коэффициентов K_e и K_d относительно среднего значения, который можно считать близким к максимально возможному разбросу из-за столь большого перечня исследований.

Результаты и обсуждение

На рисунках 2 и 3, 4 и 5, 6 и 7 представлены средние значения коэффициентов K_e и K_d для каждой весовой (возрастной) группы пациентов, для всех процедур, проводимых в области черепа и шеи, грудной клетки и брюшной полости и таза. Там же показан их разброс в пределах одного среднеквадратического отклонения ($\pm$ СКО), обусловленный различием параметров проведения процедур.

Видно, что коэффициенты K_e обладают большим относительным разбросом своих значений (СКО~55%), чем коэффициенты K_d (СКО~30%). По-видимому, это связано с тем, что коэффициенты K_e нормированы на значение поглощенной дозы в точке в воздухе вне объекта, т.е. не учитывают размеры поля излучения, падающего на объект (пациента), тогда как коэффициенты K_d учитывают размеры поля излучения, падающего на тело пациента. В первом случае коэффициент (K_e) связан с характеристикой поля вне объекта, а во втором (K_d) – с характеристикой поля, падающего на объект. Кроме того, разброс значений коэффициента K_e (> 50%), не позволяет использовать его, например, для упрощенной оценки радиационного риска, когда множество процедур в рассматриваемой области тела заменяется одной, репрезентативной [5].

Таким образом, при оценке значений эффективной дозы необходимо использовать коэффициенты K_d .

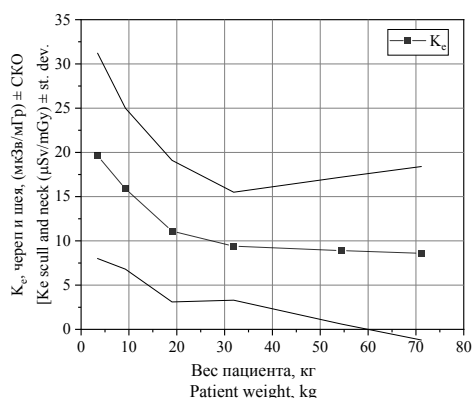


Рис. 2. Средние значения коэффициентов перехода K_e ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов черепа и шеи

[Fig. 2. Average values of conversion coefficients K_e ($\pm$ SD) for patients of different weights during radiography of the skull and neck]

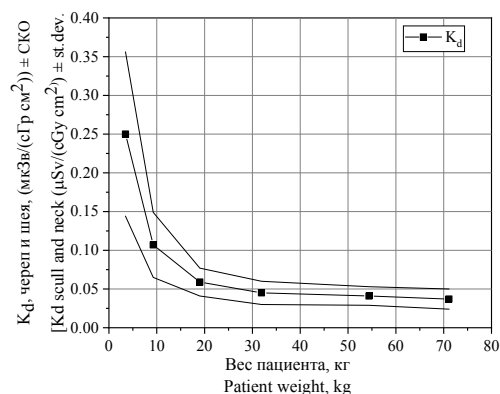


Рис. 3. Средние значения коэффициентов перехода K_d ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов черепа и шеи

[Fig. 3. Average values of the conversion coefficients K_d ($\pm$ SD) for patients of different weights during radiography of the skull and neck]

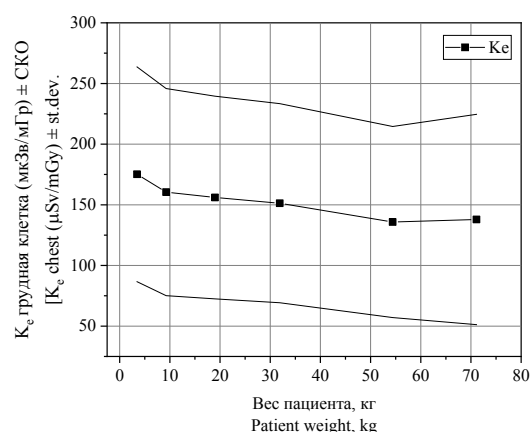


Рис. 4. Средние значения коэффициентов перехода K_e ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов грудной клетки

[Fig. 4. Mean values of conversion coefficients K_e ($\pm$ SD) for patients of different weights during chest radiography]

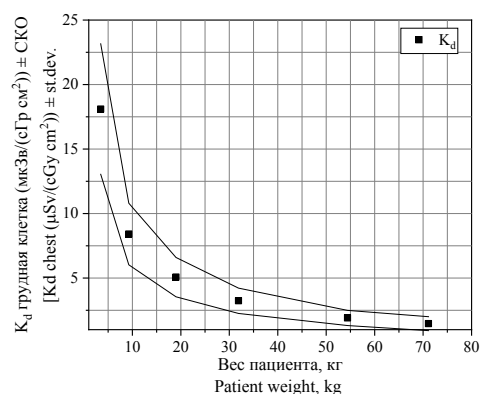


Рис. 5. Средние значения коэффициентов перехода K_d ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов грудной клетки

[Fig. 5. Mean values of the conversion coefficients K_d ($\pm$ SD) for patients of different weights during chest radiography]

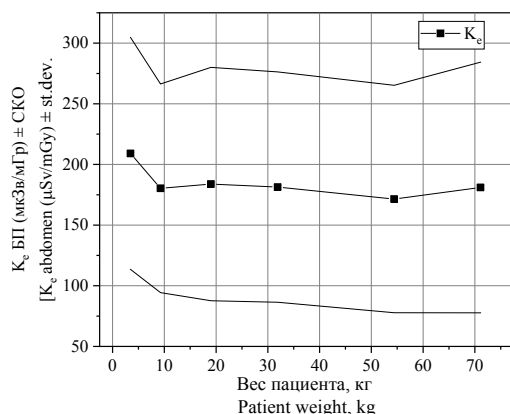


Рис. 6. Средние значения коэффициентов перехода K_e ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов брюшной полости и таза
[Fig.6. Average values of conversion coefficients K_e ($\pm$ SD) for patients of different weights during radiography of abdominal and pelvic organs]

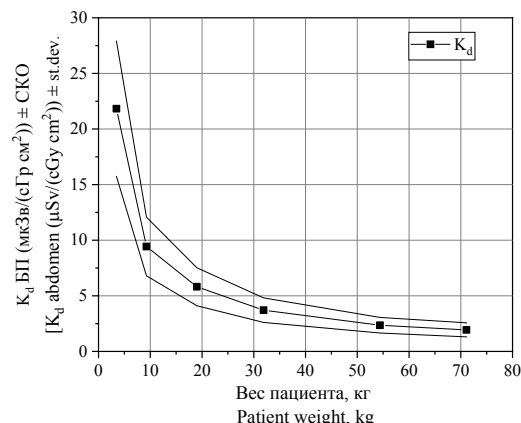


Рис. 7. Средние значения коэффициентов перехода K_d ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов брюшной полости и таза
[Fig.7. Average values of conversion coefficients K_d ($\pm$ SD) for patients of different weights during radiography of abdominal and pelvic organs]

Внутри каждой весовой группы пациентов значение коэффициента K_d для пациента стандартного веса $K_d(W^{cr})$

(см. табл. 1) может быть преобразовано к значению для пациента другого веса $K_d(W^{cr})$ согласно формуле [2].

$$K_d(W^{naq}) = K_d(W^{cm}) \cdot \frac{(1 - \exp(-0,7 \cdot \sqrt[3]{W^{naq}}))}{(1 - \exp(-0,7 \cdot \sqrt[3]{W^{cm}}))} \cdot \frac{W^{cm}}{W^{naq}}, \text{ мкЗв/(сГр} \cdot \text{см}^2)$$

Формула справедлива при разбросе веса пациентов в каждой весовой группе от значения 2,5 % до значения 97,5 %, указанных в таблице 2 [6], для всех рассмотренных областей и проекций облучения.

Кроме того, экстраполяция расчетных значений K_d до веса младенцев значительно ниже веса 2,6 кг (вплоть до веса 0,6 кг), т.е. для недоношенных младенцев, дает удовлетворительные оценки значения K_d , что подтверждается прямыми расчетами методом Монте Карло (см. рис. 8) [7]. Верификационных данных в области веса более 120 кг нами найдено не было.

Заключение

На основе информации в отношении параметров проведения рутинных рентгенологических процедур были рассчитаны значения коэффициентов перехода к эффективной дозе у пациента различного веса. Численные значения коэффициентов перехода соответствовали значениям эффективной дозы при проведении рентгенографического исследования в данной области тела, полностью определяемого набором технических, геометрических и дозиметрических параметров, нормированным на значение поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от фокуса трубки (K_e , мкЗв/(мГр·м²)) либо на значение ПДП, измеренное за время проведения исследования (K_d , мкЗв/(сГр·см²)).

Таблица 2

Разброс значений веса пациентов в различных возрастных категориях

[Table 2]

Variation in patient weight values in different age categories]

Возраст, лет [Age, years]	Вес стандартного пациента, кг [Standard patient weight, kg]	Вес пациента, кг [Patient weight, kg]	
		2,5 %	97,5 %
0	3,5	2,6	4,3
1	9,3	7,9	12,1
5	19	14,7	24,1
10	31,9	23,3	48,0
15	54,4	43,3	82,8
Взрослый [Adult]	71,1	40	120

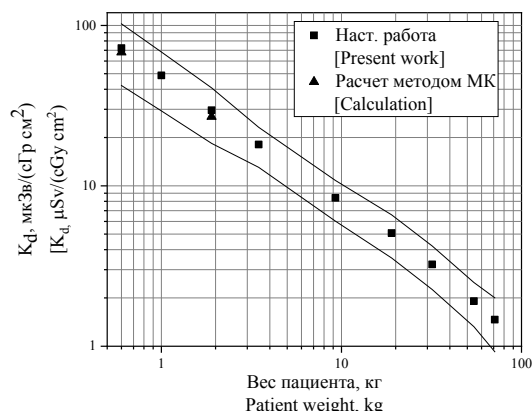


Рис. 8. Средние значения коэффициентов перехода K_d ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов грудной клетки и их экстраполяция к значениям веса недоношенных младенцев

[Fig.8. Mean values of K_d conversion factors ($\pm$ SD) for patients of different weights during chest radiography and their extrapolation to weight values of premature infants]

Показано, что коэффициенты K_e обладают большим относительным разбросом своих значений и хуже коррелируют с весом пациента, чем коэффициенты K_d . Внутри каждой весовой группы пациентов значение коэффициента K_d , указанное в таблице для пациента стандартного веса $K_d(W^{ct})$, может быть преобразовано к значению для пациента другого веса $K_d(W^{nat})$ согласно формуле, предложенной нами ранее в работе [3]. Кроме того, экстраполяция расчетных значений K_d до веса младенцев значительно ниже веса 2,6 кг (вплоть до веса 0,6 кг), то есть для недоношенных младенцев, дает удовлетворительные оценки значения K_d .

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Голиков В.Ю. – идея и руководство исследованием, написание рукописи и представление окончательного варианта статьи в редакцию журнала.

Водоватов А.В. – анализ данных и редакция промежуточного варианта статьи.

Лаврешов Д.Д. – обеспечил привлечение финансирования, предоставил исходные данные.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Международное Агентство по Атомной Энергии. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Вена, IAEA, 2015. № GSR Part 3. 518 с.
2. Golikov V., Druzhinina P. Technical Note: Patient-weight dependence of the effective dose conversion coefficients for diagnostic x-ray imaging procedures // Medical Physics. 2020. Vol. 47, No 10. P. 5366-5372. DOI:10.1002/mp.14446.
3. Golikov V., Barkovsky A., Wallström E., Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 178, No 2. P. 223-234.
4. Cristy M. Mathematical Phantoms Representing Children of Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose (Oak Ridge: National Laboratory). 1980, ORNL/ NUREG/TM-367.
5. Golikov V., Vodovатов A., Chipiga L., Shatsky I. Practical guidance on the assessment of radiation risks for diagnostic radiological examinations // Journal of Radiology Protection. 2024. No 44. P. 031514. DOI: 10.1088/1361-6498/ad72fd.
6. Chapple C.L. The optimization of radiation dose in paediatric radiology. Thesis submitted for the degree of PhD at the Faculty of Medicine University of Newcastle upon Tyne. Newcastle university library, 098 265 6, Medical Thesis L6425, 1998.
7. Smans K., Tapiovaara M., Cannie M. et al. Calculation of organ doses in x-ray examinations of premature babies // Medical Physics. 2008. No 35. P. 556.

Поступила: 04.02.2025

Голиков Владислав Юрьевич – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru
ORCID: 0009-0003-5494-2300

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

Лаврешов Дмитрий Денисович – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0009-0006-4791-7678

Для цитирования: Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Лаврешов Д.Д. Зависимость коэффициентов перехода к эффективной дозе от веса пациентов, подвергающихся рутинным рентгенологическим исследованиям // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 70–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-70-75

Effective dose conversion coefficients as a function of patient weight for routine X-ray examination

Vladislav Yu. Golikov¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Dmitry D. Lavreshov³

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 Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Based on the information regarding the parameters of routine radiographic procedures the values of the conversion coefficients to the effective dose in patients of different weights were calculated. The numerical values of the conversion coefficients correspond to the effective dose values during a given radiographic examination, which is completely determined by a set of technical, geometric, and dosimetric parameters normalized to the absorbed dose value in the air at a distance of 1 m from the tube focus (K_a , $\mu\text{Sv/mGy}$), or to the dose-area product value measured during the examination (K_d , $\mu\text{Sv}/(\text{cGy cm}^2)$). It is shown that the K_e factors have a greater relative spread of their values than the K_d factors. Within each weight group of patients, the K_d factor value for a patient of standard weight can be converted to the value for a patient of different weight. Furthermore, extrapolation of the calculated K_d values to infant weights well below 2.6 kg (down to 0.6 kg), i.e. for premature infants, yields satisfactory estimates of the K_d value.

Key words: X-ray examinations, conversion coefficients, effective dose, patients.

Authors' personal contribution

Golikov V.Yu. – idea and guidance of the study, manuscript writing and submission of the final version of the manuscript to the journal editorial board.

Vodovатов A.V. – data analysis and revision of the intermediate version of the manuscript.

Lavreshov D.D. – secured funding, provided initial data.

Conflict of interests

Authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

References

1. BSS. International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA; 2014.
2. Golikov V, Druzhinina P. Technical Note: Patient-weight dependence of the effective dose conversion coefficients for diagnostic x-ray imaging procedures. *Medical Physics*. 2020;47(10): 5366-5372. DOI:10.1002/mp.14446.
3. Golikov V, Barkovsky A, Wallström E, Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2018;178(2): 223-234.
4. Cristy M. Mathematical Phantoms Representing Children of Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose (Oak Ridge: National Laboratory). ORNL/ NUREG/TM-367; 1980.
5. Golikov V, Vodovатов A, Chipiga L, Shatsky I. Practical guidance on the assessment of radiation risks for diagnostic radiological examinations. *Journal of Radiology Protection*. 2024;44: 031514 DOI: 10.1088/1361-6498/ad72fd.
6. Chapple CL. The optimization of radiation dose in paediatric radiology. Thesis submitted for the degree of PhD at the Faculty of Medicine University of Newcastle upon Tyne. Newcastle University Library, 098 265 6. *Medical Thesis* L6425; 1998.
7. Smans K, Tapiovaara M, Cannie M, Struelens L, Vanhavere F, Smet M, Bosmans H. Calculation of organ doses in x-ray examinations of premature babies. *Medical Physics*. 2008;35: 556.

Received: February 04, 2025

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

ORCID: 0009-0003-5494-2300

Aleksandr V. Vodovатов – 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

Dmitry D. Lavreshov – Postgraduate Student of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0006-4791-7678

For citation: Golikov V.Yu., Vodovатов A.V., Lavreshov D.D. Effective dose conversion coefficients as a function of patient weight for routine X-ray examination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1, P. 70–75. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-70-75

Vladislav Yu. Golikov

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

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

Характеристика факторов, влияющих на состояние психического здоровья облученных лиц в отдаленном периоде после радиационного воздействия

Е.Ю. Буртовая, Т.Э. Кантина, Е.А. Литвинчук

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

Введение: В отдаленном периоде после радиационного воздействия существенной проблемой становится состояние психического здоровья облученных лиц. При этом, до настоящего времени отсутствует четкое понимание роли радиационного и нерадиационных факторов в развитии психических заболеваний и расстройств поведения у лиц, подвергшихся радиационному воздействию. Цель данной работы – анализ литературных данных о роли радиационного и нерадиационных факторов в генезе психических расстройств у лиц, подвергшихся облучению, в отдаленном периоде после радиационного воздействия. Материалы и методы: Обобщены литературные данные и результаты собственных исследований. Результаты исследования и обсуждение: Обобщение собранных данных показало, что изменения в состоянии психического здоровья у облученных лиц в динамике проходят от состояния психической дезадаптации до развития стойких органических психических расстройств и девиантных форм поведения. В настоящее время среди факторов, влияющих на состояние психического здоровья облученных лиц можно выделить: 1) собственно радиационное воздействие; 2) психогенный фактор, закономерно сопровождающий радиационные аварии и инциденты; 3) применение защитных мероприятий и прежде всего, переселение; 4) социальные изменения на радиоактивно загрязненных территориях (недостаточная развитость объектов социальной инфраструктуры, отсутствие достаточных инвестиций, отток социально активного населения); 5) информационный фактор (доступность информации); 6) преморбидно-личностные особенности, влияющие на восприятие радиационного риска и являющиеся одним из фоновых факторов для формирования психической патологии. Заключение: Комплексное влияние указанных факторов способствует не только формированию психической патологии, но и росту социально-психологической напряженности населения. Разработка мероприятий по взаимодействию с населением территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению (локальными лидерами, представителями общественных движений), оказание необходимой медицинской и психологической помощи позволят минимизировать негативные социальные эффекты, будут способствовать формированию адекватного восприятия радиационного риска и социально-приемлемых форм поведения.

Ключевые слова: радиационные аварии, психическое здоровье, факторы, облучение населения, отдаленные последствия.

Введение

Радиационные аварии и инциденты на современном этапе развития атомной промышленности все еще остаются вероятным событием. Их последствия длительное время являются фоном для развития личностных изменений, соматических заболеваний и психического неблагополучия вовлеченного населения.

Состояние психического здоровья облученных лиц в отдаленном периоде после радиационного воздействия и влияние факторов, обуславливающих их развитие, вызывает закономерный научный интерес исследователей и клиницистов. У пострадавших от бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС, пострадавших в результате аварии на АЭС Фукусима в отдаленном периоде после облучения развиваются астенические, тревожные и депрессивные расстройства, когнитивные нарушения, наблю-

дается рост суицидов и алкоголизма [1–6]. Определенные последствия радиационного воздействия для состояния психического здоровья населения выявлены и у лиц, подвергшихся облучению в результате аварии на Три-Майл Айленд и в результате Уральских радиационных аварий [7, 8].

Челябинская область еще в прошлом веке стала одним из крупнейших центров развития атомной промышленности в нашей стране [9, 10]. Несовершенство технологий переработки и хранения радиоактивных отходов привели к сбросу жидких радиоактивных отходов в реку Теча в 1949-1956 гг. Жители прибрежных сел подверглись многолетнему радиационному воздействию [9, 10]. Медицинское обследование и лечение населения было начато в первые годы после начала облучения. Исследование состояния психического здоровья в тот период специально не проводилось. Первые научные работы в этой области появились только в 1990-е годы. В последующие годы актуальность этих работ возросла, они

Буртовая Елена Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

стали востребованы не только отечественной наукой, но и мировым научным сообществом.

Существенной научной проблемой является определение факторов, влияющих на состояние психического здоровья лиц, подвергшихся облучению. При этом, до настоящего времени нет определенности в том, какие факторы играют ведущую роль в генезе психических расстройств и расстройств поведения у лиц, подвергшихся облучению. В статьях отечественных и зарубежных исследователей можно встретить разнонаправленные утверждения: в одних работах в качестве основного фактора рассматривается радиационный фактор, в других – перенесенное стрессовое воздействие, третьи утверждают, что совокупное действие радиационного, психогенного и сопутствующих нерадикационных факторов (информационного, социально-экономического и др.) способствует развитию психической дезадаптации, а в дальнейшем – психическим расстройствам у лиц, подвергшихся облучению.

Цель исследования – анализ литературных данных о роли радиационного и нерадикационных факторов в генезе психических расстройств у лиц, подвергшихся облучению, в отдаленном периоде после радиационного воздействия.

Материалы и методы

В обзоре использованы доступные публикации на русском и английском языках из библиографических баз eLIBRARY, PubMed, Google Scholar, RusMed. Поиск публикаций осуществлялся по следующим ключевым словам: психическое здоровье облученных лиц, психические расстройства у облученных лиц, факторы, влияющие на состояние психического здоровья облученных лиц (mental health of exposed persons, mental disorders in exposed persons, factors affecting the state of mental health status of exposed persons). В анализ было включено 42 публикации. Из анализа исключались публикации с невозможностью доступа к полному тексту. В рамках данного обзора анализировали выявленные психические расстройства и расстройства поведения у лиц, подвергшихся облучению, а также выявленные факторы, влияющие на состояние психического здоровья облученных лиц, в отдаленном периоде после радиационного воздействия.

Результаты и обсуждение

Радиационный фактор

В работе Robert W. Miller было показано, что у детей, подвергшихся облучению в период внутриутробного развития, в результате взрыва атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму, наблюдалась микроцефалия (окружность головы была на 2 или более стандартных отклонения ниже нормы). У 15 из 33 исследуемых пациентов наблюдалась умственная отсталость. Исследователь отмечал, что частота и тяжесть микроцефалии и умственной отсталости были связаны с расстоянием от центра взрыва [11]. Аналогичные результаты были получены исследователями в рамках международной программы изучения медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС [12]. При совокупном анализе данных Российской Федерации, Белоруссии и Украины было показано, что распространенность легкой умственной отсталости у внутриутробно облученных детей превышает таковую в контрольных группах; отмечен возрастающий тренд частоты случаев эмоционально-поведенческих расстройств у детей, облученных *in utero* [12]. Одним из возможных биологических механизмов про-

исхождения нервно-психических расстройств у пренатально облученных детей авторы считали радиационно-индуцированную дисфункцию гипофизарно-тиреоидной системы при пороге эффекта 0,3 Гр на щитовидную железу *in utero* [12].

В исследовании С.А. Игумнова и соавторов [13, 14] ассоциации между внутриутробным облучением и снижением IQ, а также ухудшением психического здоровья детей не было выявлено. Повышенная частота специфических расстройств развития речи и эмоциональных нарушений, а также более низкий усредненный балл общего IQ при большем числе случаев пограничного IQ у пренатально облученных жителей Белоруссии были атрибутированы прежде всего к психогенным, а также социальным факторам [13, 14].

При оценке психиатрических последствий у выживших после взрыва атомной бомбы в Хиросиме и Нагасаки спустя два десятилетия после взрыва показали, что у людей с острыми лучевыми поражениями наблюдалась более высокая распространенность симптомов тревожности и соматизации. Распространенность данных симптомов среди людей, находившихся в городе во время взрыва, была значительно выше, чем среди тех, кто находился за пределами города [15].

Исследователями из Казахстана была проведена оценка состояния психического здоровья взрослого населения в зависимости от близости проживания к Семипалатинскому полигону. Исследование 1041 пациента в возрасте от 18 до 60 лет показало, что характер выраженности тех или иных психических расстройств коррелировал с близостью проживания к Семипалатинскому полигону, при этом выявленные психические нарушения были полиморфны и многообразны: выявляли невротические расстройства (18,5%), расстройства приспособительных реакций (17,6%), неврастению (16,2%). Наблюдали стигматизацию населения из-за страха перед радиацией, её угрозой жизни и здоровью [16–19]. В Гомельской области (Беларусь) с помощью опросника общего состояния здоровья проводили оценку психопатологических симптомов у населения. В выборке из этой области показатели тревожных и депрессивных симптомов были намного выше, чем в демографически схожей группе, проживающей на большем расстоянии от Чернобыля. Однако разница в показателях распространенности клинически диагностируемых психических расстройств между двумя группами не была статистически значимой [20].

Психогенный фактор и переселение на чистые территории

Результаты оценки состояния психического здоровья пострадавших в результате аварии на АЭС Фукусима показали, что выявленная патология была обусловлена эвакуацией и сопутствующей стрессовой нагрузкой, связанной с изменившимся привычным образом жизни, а не действием ионизирующего излучения [21–24].

По данным Архангельской Г.В. и соавторов, лонгитюдное обследование психического здоровья среди почти 60 500 эвакуированных после аварии на АЭС «Фукусима-1», выявило три основных фактора, ведущих к обострению таких психических расстройств, как депрессивные состояния: обостренное восприятие радиационного риска (особенно страх перед генетическими эффектами), социальная изоляция, нарушения сна [25]. Согласуются с этими выво-

дами результаты оценки состояния психического здоровья эвакуантов и переселенных лиц после аварии на Чернобыльской АЭС, у которых наблюдали выраженные невротические и психосоматические расстройства [26]. При этом, переселенцы наиболее значимыми считали ухудшение экономического состояния и плохую доступность медицинской помощи.

Оценить состояние психического здоровья и социально-психологические проблемы жителей прибрежных сел реки Теча, переселенных на чистые территории в середине двадцатого века, не представляется возможным, поскольку в тот период не уделяли внимания данной проблеме. В период 2006–2010 гг. в Челябинской области действовала программа переселения жителей села Муслумово (территория, подвергшаяся загрязнению в результате сбросов радиоактивных отходов в реку Теча). На фоне этого мероприятия сотрудниками ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России проведено исследование состояния психического здоровья жителей, участвовавших в программе переселения: первично – в 2008–2010 гг. – на фоне переселения, повторно – в 2019–2020 гг. – спустя 10 и более лет после переселения. Установлено, что как при первичном, так и при повторном исследовании статистически значимо чаще ($p < 0,001$) наблюдали невротические, связанные со стрессом и соматоформные расстройства (F 40) у переселенных лиц в сравнении с контрольной группой. Полученные данные позволяют предположить долгосрочный эффект отселения на состояние психического здоровья вовлеченного населения [27].

Применение мер защитного характера является важным, часто необходимым мероприятием, но при этом имеющим самостоятельное психогенное воздействие. Многочисленные исследования состояния психического здоровья населения, эвакуированного после аварии на АЭС Фукусима, показали, что именно среди этого населения наблюдали рост тревожных, депрессивных расстройств, увеличение злоупотребления алкоголем и большую частоту самоповреждающего поведения и суицидальных попыток [5, 21]. Действительно, вынужденная смена места жительства сопровождается серьезными изменениями в повседневной жизни человека, ломкой стереотипов привычного поведения, разрывом имеющихся межличностных связей, необходимостью решать целый ряд бытовых и социальных вопросов, связанных с новым местом проживания, трудоустройством и т.д., необходимостью незапланированных финансовых вложений.

Информационный фактор

Недостаточное и/или неадекватное информирование по вопросам радиационного риска оказывает негативное влияние на население [28–30]. По результатам социально-психологических опросов жителей радиоактивно загрязненных территорий (РЗТ) Челябинской области, поток противоречивой информации из СМИ оказал большее влияние на их здоровье, чем само ионизирующее излучение, поскольку привел к неадекватному восприятию радиационной обстановки [29]. Особенностью Уральских радиационных инцидентов стала абсолютная недоступность информации для населения в течение нескольких десятилетий после произошедшего, что способствовало формированию мифов и домыслов о масштабах и последствиях аварий для собственного здоровья и здоровья потомков. Снятие грифа секретности привело к появлению разноречивой, порой взаимоисключающей информации, что обусловило появление недоверия населения не только к органам государственной власти, но и

к ученым, и к средствам массовой информации [29]. Результаты опросов, выполненных Г.В. Архангельской и соавторами, показали, что основными факторами, поддерживающими завышенную оценку населением опасности радиации для здоровья, являются: отсутствие у населения научно обоснованных знаний о радиации; недостаточные знания об иных существующих реально факторах опасности; особенности восприятия человеком радиационного воздействия, которое не дано в прямом ощущении (косвенное и информационное формирование представлений о радиации и радиационной опасности); ложная уверенность в неотвратимости возникновения неблагоприятных для здоровья последствий в течение всей последующей жизни человека в результате радиационного воздействия [28]. Тщательно спланированная и правильно поданная информация – один из инструментов в системе мер по снижению психоэмоционального напряжения и оптимизации психофизиологического статуса населения [30].

Личностно-психологические особенности

Определенное значение в формировании отдаленных психических расстройств у облученных лиц имеют преморбидные личностно-психологические особенности. Так, для пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС характерна социальная пассивность, склонность к самоанализу, инертность, эмоциональная лабильность, дезадаптированность, доминирование в поведении стратегий избегания проблем и усилий по регулированию своих чувств и действий. Индивидуально-типологическими маркерами гипертрофированного восприятия радиационной угрозы может быть наличие преморбидных характерологических черт, а именно педантичности, тревожности, циклотимности, дистимности, акцентуированных черт, а именно – гипертимности, застревания, эмотивности и экстравертированной направленности личности [31]. Полученные данные свидетельствуют о наличии у пострадавших длительного психологического стресса, обусловленного гиперболизацией опасности воздействия ионизирующего излучения и необходимости коррекционной и психотерапевтической работы [31–33].

Восприятие радиационного риска

При исследовании проблем восприятия радиационного риска, проблем риск-коммуникации отечественные ученые установили, что радиация воспринимается обществом как одна из самых значительных угроз для жизни и здоровья; население слабо информировано о развитии атомной отрасли в России, а атомные электростанции воспринимаются как источник опасности из-за возможности потенциальных аварий [34–36].

Результаты собственных исследований показали, что до настоящего времени жители населенных пунктов Челябинской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению, считают, что радиационная авария явилась особо значимым или значимым событием в их жизни (60,6 % среди жителей населенных пунктов бассейна реки Теча и 31,8 % проживающих в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа считают это особо значимым событием) [37].

Комплексное влияние факторов

В работе Румянцевой Г.М. и соавторов приведены результаты лонгитюдного исследования здоровья лиц, проживающих на загрязненных территориях и участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС,

в которых было задействовано более 2,5 тысяч ликвидаторов и более 5 тысяч человек, проживающих на территориях с различной степенью радиоактивного загрязнения. По результатам исследования установлено, что среди ликвидаторов аварии наиболее распространены были органическое психическое расстройство сосудистого или смешанного генеза, депрессивные расстройства; у населения – различные варианты нарушения адаптации, а соматоформные и соматизированные расстройства, разнообразные расстройства личности – и у тех, и у других [38, 39]. При этом, авторы выделяли влияние нескольких факторов: радиационного, стрессового и влияние хронической алкогольной интоксикации [38, 39].

Указанные выше факторы способствуют формированию психической дезадаптации, которая проявляется: снижением социального приспособления (неуверенность в завтрашнем дне, неприспособленность к изменившимся условиям, ощущение социального тупика); стойким изменением направленности внимания от проблем внешних к внутренним, связанным со здоровьем; усилением субъективного восприятия соматического дискомфорта; заострением преморбидных черт личности, появление новых психологических качеств (утрата «пластичности общения», конфликтность, цинизм, склонность к антисоциальным действиям) [40]. Так, при оценке общей характеристики уровня агрессии жителей РЗТ Челябинской и Курганской областей (Buss-Durkee Hostility Inventory, BDHI) выявлено, что у них отмечается высокий уровень вербальной агрессии, подозрительности и раздражения [40].

При изучении заболеваемости психическими расстройствами населения муниципальных районов Челябинской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению, в отдаленном периоде после облучения, выявили, что уровень первичной заболеваемости психическими расстройствами в Челябинской области ($49,1 \pm 3,6$)⁰/₀₀₀ значительно превышает ($p < 0,01$) показатели в Свердловской – ($30,3 \pm 4,2$)⁰/₀₀₀, Курганской – ($30,2 \pm 6,9$)⁰/₀₀₀ областях и в России в целом – ($32,9 \pm 3,8$)⁰/₀₀₀. В отдаленном периоде у населения, проживавшего на радиоактивных территориях, уровень первичной заболеваемости психическими расстройствами в ряде районов больше, чем у жителей радиоактивно не загрязненных территорий, но оказался существенно меньше общих показателей по Челябинской области ($p < 0,001$). С учетом распределения облученных жителей и их потомков по территории Челябинской области углубленного внимания заслуживает заболеваемость умственной отсталостью на территории Кунашакского района [41]. Оценивая отдаленные психические расстройства у лиц, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения в результате сброса радиоактивных отходов в реку Теча, следует отметить, что выявляемая патология характеризуется непсихотическим уровнем и представлена, в основном, органическими психическими расстройствами. Ведущими в структуре психической патологии являются астенические, когнитивные и аффективные (депрессивные) расстройства [41].

Отличительной чертой пострадавших от Южно-Уральских радиационных инцидентов является высокий уровень «радиофобии», выраженной страхом и тревожностью в отношении к развитию атомной промышленности в регионе. Многие связывают ухудшение самочувствия, заболеваемость и факты смерти исключительно с радиа-

ционным воздействием. Для большинства населения РЗТ будущее выглядит пессимистично. Подавляющее число (82 %) живет с постоянным ощущением «дамоклова меча» очередной катастрофы [41]. Эти результаты демонстрирует, что проблемы взаимодействия с населением, подвергшимся воздействию ионизирующего излучения в результате радиационных аварий и катастроф, являются ключевыми не только в раннем периоде после чрезвычайных ситуаций, но и спустя длительное время. Активное просвещение населения по вопросам радиационной безопасности может помочь уменьшить страх перед радиацией и повлиять на восприятие радиационного риска, поскольку коммуникация между населением и представителями атомной промышленности и государственной власти по-прежнему остается серьезной проблемой [41, 42].

Заключение

Анализ имеющейся информации показывает, что изменения в состоянии психического здоровья у населения, подвергшегося радиационному воздействию, носят стойкий характер. Особенности возникающих при этом психических и психологических проявлений, формирование социально-психологической напряженности у населения, демонстрирует, что общество крайне чувствительно воспринимает риск в отношении ухудшения здоровья облученных лиц и их потомков. Среди факторов, оказывающих влияние на состояние психического здоровья и социально-психологический статус облученных лиц в отдаленном периоде можно выделить:

- объективные факторы радиационных аварий (ионизирующее излучение, возможность новых потенциальных радиационных аварий, угроза ядерного терроризма);
- психогенный фактор, закономерно сопутствующие радиационным авариям и определяющие социально-психологическое состояние населения;
- проведение мероприятий защитного характера (переселение жителей),
- действие информационного фактора,
- социальная среда, в которой реализуется повышенный риск (доверие к органам власти, роль общественных организаций, наличие развитой социальной инфраструктуры территорий, возможность социального развития и др.),
- преморбидно-личностные особенности (адекватность восприятия опасности, выгодность, рентные установки), влияющие на восприятие радиационного риска вовлеченным населением.

Полученные данные позволяют сделать заключение о мультифакториальности развивающихся в отдаленном периоде после облучения психических расстройств и расстройств поведения. Комплексная оценка выделенных факторов позволит определить подходы к формированию групп риска по развитию психических расстройств и расстройств поведения среди населения, подвергшегося облучению. При этом, выявленные факторы должны быть использованы в качестве мишеней воздействия при разработке программ и моделей взаимодействия органов государственной власти и представителей атомной промышленности с населением и общественными организациями для формирования адекватного восприятия радиационного риска населением, снижения социально-психологической напряженности и формирования социально-приемлемых поведенческих стратегий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Буртова Е.Ю. – существенный вклад в разработку концепции научной работы, составление черновика рукописи, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Кантина Т.Э. – работа с источниками литературы, интерпретация данных.

Литвинчук Е.А. – работа с источниками литературы, анализ результатов собственных исследований, интерпретация данных.

Благодарности

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за существенную помощь в подготовке статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена по материалам прикладной НИР «Оценка роли нерадиационных факторов в генезе психических расстройств у лиц, подвергшихся аварийному радиационному воздействию, в отдаленном периоде после облучения», (шифр: «Факторы»), выполняемой в рамках Государственного задания ФМБА России.

Литература

1. Bromet E.J. Mental health consequences of the Chernobyl disaster // *Journal of Radiological Protection*. 2012. Vol. 32. P. 71–75. DOI:10.1088/0952-4746/32/1/N71.
2. Bromet E.J., Havenaar J.M., Guey L.T. A 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident // *Journal of Clinical Oncology*. 2011. Vol. 23. P. 297–305. DOI:10.1016/j.clon.2011.01.502.
3. Laidra K., Rahu K., Tekkel M. et al. Mental health and alcohol problems among Estonian cleanup workers 24 years after the Chernobyl accident // *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*. 2015. Vol. 50. P. 1753–1760. DOI:10.1007/s00127-015-1102-6.
4. Ando S., Kuwabara H., Araki T. et al. Mental health problems in a community after the Great East Japan Earthquake in 2011 // *Harvard Review of Psychiatry*. 2017. Vol. 25, № 1. P. 15–28. DOI:10.1097/HRP.000000000000124.
5. Oe M., Fujii S., Maeda M. et al. Three year trend survey of psychological distress, posttraumatic stress, and problem drinking among residents in the evacuation zone after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident [The Fukushima Health Management Survey] // *Psychiatry and Clinical Neurosciences*. 2016. Vol. 70, No 6. P. 245–252. DOI:10.1111/pcn.12387.
6. Loganovsky K., Marazziti D. Mental health and neuropsychiatric aftermath 35 years after the Chernobyl catastrophe: current state and future perspectives // *Clinical Neuropsychiatry*. 2021. Vol. 18, No 2. P. 101–106. DOI:10.36131/cnfioritiditore20210204.
7. Bromet E.J., Parkinson D.K., Schulberg H.C. et al. Mental health of residents near the Three Mile Island reactor: A comparative study of selected groups // *Journal of Preventive Psychiatry*. 1982. Vol. 1, No 3. P. 225–275.
8. Oe M., Takebayashi Y., Sato H., Maeda M. Mental health consequences of the Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima nuclear disasters: a scoping review // *International journal of environmental research and public health*. 2021. Vol. 18, No 14. P. 7478. DOI:10.3390/ijerph18147478.
9. Аклев А.В., Косенко М.М., Крестинина Л.Ю. и др. Здоровье населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях Уральского региона. М.: РАДЭКОН, 2001. 195 с.
10. Аклев А.В. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга, 2012. 464 с.
11. Robert W. Miller Delayed effects occurring within the first decade after exposure of young individuals to the Hiroshima atomic bomb // *Pediatrics*. 1956. Vol. 18, No 1. P. 1–18.
12. Nyagu A.I., Loganovsky K.N., Loganovskaya T.K. et al. Intelligence and brain damage in children acutely irradiated in utero as a result of the Chernobyl accident. In: T. Imanaka (Ed.) KURRI-KR-79. Recent Research Activities about the Chernobyl NPP Accident in Belarus, Ukraine and Russia. Kyoto, Japan: Research Reactor Institute, Kyoto University, 2002. P. 202–230.
13. Igumnov S. The brain bioelectric activity of the Belarusian persons irradiated in utero as a result of Chernobyl accident // *Activitas Nervosa Superior Rediviva*. 2009. Vol. 51, No 1–2. P. 55–60.
14. Igumnov S., Drozdovitch V. The intellectual development, mental and behavioral disorders in children from Belarus exposed in utero following the Chernobyl accident // *European Psychiatry*. 2000. Vol. 15. P. 244–253.
15. Yamada M., Izumi S. Psychiatric sequelae in atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki two decades after the explosions // *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*. 2002. № 37(9). P. 409–415. DOI: 10.1007/s00127-002-0572-5.
16. Суханбердина А.С., Сарсембина Ж.Д. Психические расстройства у лиц, проживающих в районе Семипалатинского полигона // *Российский психиатрический журнал*. 2009. № 5. С. 31–35.
17. Манатова А.М., Семенова Ю.М., Пивина Л.М. и др. Оценка психологического статуса лиц, проживающих в условиях радиационного воздействия: систематический обзор // *Наука и здравоохранение*. 2017. № 5. С. 145–157.
18. Мулдагалиев Т.Ж., Семёнова Ю.М. Анализ и оценка нарушений вегетативной регуляции среди лиц с соматоформными расстройствами и проживающих на территориях, прилегающих к Семипалатинскому ядерному полигону // *Наука и здравоохранение*. 2014. № 2. С. 16–19.
19. Мулдагалиев Т.Ж., Белихина Т.И., Жаекбаева Л.К. и др. Распространенность психических расстройств среди экспонированного населения Бородулихинского района Восточно-Казахстанской области и их потомков в отдаленные сроки после радиационного воздействия // *Наука и здравоохранение*. 2012. № 4. С. 25–28.
20. Bolt M.A., Helming L.M., Tintle N.L. The Associations between self-reported exposure to the Chernobyl nuclear disaster zone and mental health disorders in Ukraine // *Frontiers in Psychiatry*. 2018. P. 9–32. DOI:10.3389/fpsy.2018.00032.
21. Orita M., Mori K., Taira Y. et al. Psychological health status among former residents of Tomioka, Fukushima Prefecture and their intention to return 8 years after the disaster at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant // *Journal of Neural Transmission*. 2020. Vol. 127, No 11. P. 1449–1454. DOI: 10.1007/s00702-020-02160-8.
22. Murakami M., Takebayashi Y., Tsubokura M. Lower Psychological Distress Levels among Returnees Compared with Evacuees after the Fukushima Nuclear Accident // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. 2019. Vol. 247, No 1. P. 13–17. DOI: 10.1620/tjem.247.13.
23. Lieber M. Assessing the Mental Health Impact of the 2011 Great Japan Earthquake, Tsunami, and Radiation Disaster on Elementary and Middle School Children in the Fukushima Prefecture of Japan // *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12, No 1. P. e0170402. DOI: 10.1371/journal.pone.0170402.

24. Hori A., Tsumuraya K., Kanamori R. et al. Report from Minamisoma City: Diversity and Complexity of Psychological Distress in Local Residents After a Nuclear Power Plant Accident // *Seishin Shinkeigaku Zasshi*. 2014. Vol. 116, No 3. P. 212–218.
25. Авария на АЭС «Фукусима-1»: радиологические последствия и уроки / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2021. 388 с.
26. Бронский В.И., Толканец СВ. Результаты психосоматического скрининга эвакуированного из зоны отчуждения населения, пострадавшего от Чернобыльской катастрофы // *Здравоохранение*. 2000. № 7. С. 45–48.
27. Буртовая Е.Ю. Психическое здоровье жителей радиоактивно загрязненных территорий Челябинской области в отдаленном периоде после отселения // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 1. С. 18–24. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-18-24.
28. Архангельская Г.В., Зыкова И.А., Зеленцова С.А. Трудности информирования населения по вопросам радиационной безопасности // *Радиационная гигиена*. 2014. Т. 7, № 2. С. 42–49.
29. Аклев А.В., Гриценко В.П., Марченко Т.А. Социально-психологические последствия аварийного облучения населения Уральского региона. М.: «РАДЭКОН», 2008. 351 с.
30. Марченко Т.А., Мельницкая Т.Б., Симонов А.В., Апанасюк О.Н. Информационно-психологическая защита населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях: принципы, методы, опыт // *Технологии гражданской безопасности*. 2014. № 2 (40). С. 50–56.
31. Румянцева Г.М., Чинкина О.В. Проблемы восприятия и субъективной оценки риска от ионизирующей радиации // *Радиационная гигиена*. 2009. Т. 2, № 3. С. 50–58.
32. Савельева М.В., Гудзь Ю.В. Факторы психологического статуса пострадавших в радиационной аварии, смягчающие развитие психосоматических расстройств в отдаленном периоде // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2022. № 1. P.117–125. DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-1-117-125.
33. Kashiwazaki Y., Takebayashi Y., Murakami M. Relationships between radiation risk perception and health anxiety, and contribution of mindfulness to alleviating psychological distress after the Fukushima accident: Cross-sectional study using a path model // *PLoS ONE*. 2020. Vol. 15, No 7. P. e0235517. DOI: 10.1371/journal.pone.0235517.
34. Архангельская Г.В., Зеленцова С.А., Вишнякова Н.М. и др. Проблемы риск-коммуникаций по вопросам радиационной безопасности: оценка информированности населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области о деятельности атомной отрасли и его представления о факторах опасности // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 3. С. 36–45. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-36-45.
35. Библин А.М., Архангельская Г.В., Зеленцова С.А. и др. Проблемы риск-коммуникации по вопросам радиационной безопасности: предпочтения населения Ленинградской и Мурманской областей в источниках получения информации // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 2. С. 60–73. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-60-73.
36. Соколов Н.В., Библин А.М., Репин Л.В., Рехтина Л.С. Проблемы риск-коммуникации при обеспечении радиационной безопасности: представление о радиации и атомной отрасли в массовом сознании по результатам социологических исследований в Санкт-Петербурге, Ленинградской и Мурманской областях // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 3. С.45–56. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-45-56.
37. Буртовая Е.Ю., Аклев А.В., Шалагинов С.А. Психосоциальные аспекты переселения жителей села Муслюмово Челябинской области вследствие чрезвычайных ситуаций на производственном объединении «Маяк» // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2011. № 2. С. 105–108.
38. Румянцева Г.М., Левина Т.М., Чинкина О.В. и др. Особенности психолого-психиатрических последствий радиационных аварий // *Экология человека*. 2007. № 9. С. 42–47.
39. Румянцева Г.М., Муравьев И.А., Левина Т.М., Сидорюк О.В. Распространенность психических расстройств среди населения, пострадавшего от радиационной аварии: структура, динамика, факторы риска // *Радиационная гигиена*. 2013. Т. 6, № 2. С. 21–26.
40. Аклев А.В., Новоселов В.Н., Шалагинов С.А. и др. Теча: до и после атомного проекта. Челябинск: «Книга», 2015. 352 с.
41. Буртовая Е.Ю., Аклев А.В., Барковская Л.П. и др. Заболеваемость психическими расстройствами населения муниципальных районов Челябинской области, подвергшихся аварийному радиоактивному загрязнению в отдаленном периоде // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2021. № 1. С. 22–30. DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-1-22-30.
42. Slovic P. The perception gap: Radiation and risk // *Journal Bulletin of the Atomic Scientists*. 2012. Vol.68, No 3. P. 67–75. DOI: 10.1177/0096340212444870.

Поступила: 11.11.2024

Буртовая Елена Юрьевна – кандидат медицинских наук, заместитель директора по науке, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 454141, г. Челябинск, ул. Воровского 68-А, корпус 1; E-mail: burt@urcrm.ru

ORCID: 0000-0002-1260-7745

Кантина Татьяна Эдуардовна – младший научный сотрудник лаборатории экологической патопсихологии, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0001-6001-4111

Литвинчук Елена Александровна – младший научный сотрудник лаборатории экологической патопсихологии, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0003-0061-7134

Для цитирования: Буртовая Е.Ю., Кантина Т.Э., Литвинчук Е.А. Характеристика факторов, влияющих на состояние психического здоровья облученных лиц в отдаленном периоде после радиационного воздействия // *Радиационная гигиена*. 2025. Т. 18, № 1. С. 76–84. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-76-84

Characteristics of factors affecting the mental health of exposed persons in the long-term period after radiation exposure

Elena Yu. Burtovaya, Tatyana E. Kantina, Elena A. Litvinchuk

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

Introduction: In the long-term period after radiation exposure, the mental health status of the exposed persons becomes a significant problem. At the same time, there is still no clear understanding of the role of radiation and non-radiation factors in the development of mental illnesses and behavioral disorders in the exposed people. The objective of this study is to analyze the published data on the contribution of radiation and non-radiation factors to the development of mental disorders in exposed people in the long term period after radiation exposure. **Materials and Methods:** A generalization of the literature data and the results of our own research was observed. **Results and Discussion:** A generalization of the collected data have shown that changes in the state of mental health in irradiated individuals in dynamics ranged from a state of mental maladaptation to the development of persistent organic mental disorders and deviant behaviors. Currently, among the factors affecting the mental health of irradiated persons, it is possible to distinguish: 1) radiation exposure itself; 2) psychogenic factor, which naturally accompanies radiation accidents and incidents; 3) the use of protective measures and, above all, resettlement; 4) social changes in radioactively contaminated territories (insufficient development of social infrastructure facilities, lack of sufficient investments, outflow of socially active population); 5) information factor (accessibility to objective information); 6) premorbid personality traits that affect the perception of radiation risk and are one of the background factors for the formation of mental pathology. **Conclusion:** The complex influence of these factors contributes not only to the formation of mental pathology but also to the growth of socio-psychological tension of the population. The development of measures on interaction with the population of the territories exposed to radioactive contamination (local leaders, representatives of social movements), the provision of necessary medical and psychological assistance will minimize negative social effects and contribute to the formation of adequate perception of radiation risk and socially acceptable forms of behavior.

Key words: radiation accidents, mental health, factors, public exposure, long-term effects.

Authors' personal contribution

Burtovaya E.Yu. – a significant contribution to the development of the concept of scientific work, the drafting of the manuscript, the final approval of the published version of the manuscript.

Kantina T.E. – data collection, interpretation of data.

Litvinchuk E.A. – data collection, analysis and interpretation of results.

Acknowledgments

The research was carried out on the basis of the Federal State Budgetary Institution of Science "Seve

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

Sources of funding

The article is based on the materials of applied research "Assessment of the role of non-radiation factors in the genesis of mental disorders in persons exposed to emergency radiation exposure in the long-term period after exposure", (code: "Factors"), performed within the framework of the State assignment of the FMBA of Russia.

References

1. Bromet EJ. Mental health consequences of the Chernobyl disaster. *Journal of Radiological Protection*. 2012;32: 71–75. DOI:10.1088/0952-4746/32/1/N71.
2. Bromet EJ, Havenaar JM, Guey LT. A 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident. *Journal of Clinical Oncology*. 2011;23: 297–305. DOI: 10.1016/j.clon.2011.01.502.
3. Laidra K, Rahu K, Tekkel M, Aluoja A, Leinsalu M. Mental health and alcohol problems among Estonian cleanup workers 24 years after the Chernobyl accident. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*. 2015;50: 1753–1760. DOI: 10.1007/s00127-015-1102-6.
4. Ando S, Kuwabara H, Araki T, Kanehara A, Tanaka S, Morishima R, et al. Mental health problems in a community after the Great East Japan Earthquake in 2011. *Harvard Review of Psychiatry*. 2017;25(1): 15–28. DOI: 10.1097/HRP.0000000000000124.
5. Oe M, Fujii S, Maeda M, Nagai M, Harigane M, Miura I, et al. Three year trend survey of psychological distress, posttraumatic stress, and problem drinking among residents in the evacuation zone after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*. 2016;70(6): 245–252. DOI: 10.1111/pcn.12387.
6. Loganovsky K, Marazziti D. Mental health and neuropsychiatric aftermath 35 years after the Chernobyl catastrophe: current state and future perspectives. *Clinical Neuropsychiatry*. 2021;18(2): 101–106. DOI: 10.36131/cnforiteditore20210204.
7. Bromet EJ, Parkinson DK, Schulberg HC, et al. Mental health of residents near the Three Mile Island reactor: A comparative study of selected groups. *Journal of Preventive Psychiatry*. 1982;1(3): 225–275.

Elena Yu. Burtovaya

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

8. Oe M, Takebayashi Y, Sato H, Maeda M. Mental health consequences of the Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima nuclear disasters: a scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(14): 7478. DOI: 10.3390/ijerph18147478.
9. Akleev AV, Kosenko MM, Krestinina LYu, et al. Health of the population living in radioactively polluted territories of Ural region. Moscow; 2001. 195 p. (In Russian).
10. Akleev AV. Chronic radiation syndrom among residents of the coastal villages of the Tcha river. Chelyabinsk: Book; 2012. 464 p. (In Russian).
11. Miller RW. Delayed effects occurring within the first decade after exposure of young individuals to the Hiroshima atomic bomb. *Pediatrics*. 1956;18(1): 1–18.
12. Nyagu AI, Loganovsky KN, Loganovskaya TK, Repin VS, Nechaev SYu. Intelligence and brain damage in children acutely irradiated in utero as a result of the Chernobyl accident. In: T. Imanaka (Ed.) KURRI-KR-79. Recent Research Activities about the Chernobyl NPP Accident in Belarus, Ukraine and Russia. Kyoto, Japan: Research Reactor Institute, Kyoto University; 2002. P. 202–230.
13. Igumnov S. The brain bioelectric activity of the Belarusian persons irradiated in utero as a result of Chernobyl accident. *Activitas Nervosa Superior Rediviva*. 2009;51(1-2): 55–60.
14. Igumnov S, Drozdovich V. The intellectual development, mental and behavioral disorders in children from Belarus exposed in utero following the Chernobyl accident. *European Psychiatry*. 2000;15: 244–253.
15. Yamada M, Izumi S. Psychiatric sequelae in atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki two decades after the explosions. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*. 2002;37(9): 409–415. DOI: 10.1007/s00127-002-0572-5.
16. Sukhanberdina AS, Sarsembina ZhD. Psychic disorders in persons residing in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site. *Rossiyskiy psikiatricheskii zhurnal = Russian Psychiatric Journal*. 2009;5: 31–35. (In Russian).
17. Manatova AM, Semenova YuM, Pivina LM, Belikhina TI, Dyusupov AA. Assessment of the psychological status of people living in the conditions of radiation exposure: a systematic review. *Nauka i Zdravookhranenie = Science and Healthcare*. 2017;5: 145–157. (In Russian).
18. Muldagaliev TZh, Semenova YuM. Analysis and evaluation of autonomic imbalance disorders among individuals with somatoform disorders living in areas adjoining to the Semey nuclear test site. *Nauka i Zdravookhranenie = Science and Healthcare*. 2014;2: 16–19. (In Russian).
19. Muldagaliev TZh, Belikhina TI, Zhazykbaeva LK, Tokanov AM. Prevalence of mental frustration among the exhibited population of Borodulikh area of EK and their descendants in the remote term after radiating influence. *Nauka i Zdravookhranenie = Science and Healthcare*. 2012;4: 25–28. (In Russian).
20. Bolt MA, Helming LM, Tintle NL. The associations between self-reported exposure to the Chernobyl nuclear disaster zone and mental health disorders in Ukraine. *Frontiers in Psychiatry*. 2018;9–32. DOI: 10.3389/fpsy.2018.00032
21. Orita M, Mori K, Taira Y, Yamada Y, Maeda M, Takamura N. Psychological health status among former residents of Tomioka, Fukushima Prefecture and their intention to return 8 years after the disaster at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Journal of Neural Transmission*. 2020;127(11): 1449–1454. DOI: 10.1007/s00702-020-02160-8.
22. Murakami M, Takebayashi Y, Tsubokura M. Lower psychological distress levels among returnees compared with evacuees after the Fukushima nuclear accident. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. 2019;247(1): 13–17. DOI: 10.1620/tjem.247.13.
23. Lieber M. Assessing the mental health impact of the 2011 great Japan earthquake, tsunami, and radiation disaster on elementary and middle school children in the Fukushima Prefecture of Japan. *PLoS ONE*. 2017;12(1): e0170402. DOI: 10.1371/journal.pone.0170402.
24. Hori A, Tsumuraya K, Kanamori R, Maeda M, Yabe H, Niwa S. Report from Minamisoma City: diversity and complexity of psychological distress in local residents after a nuclear power plant accident. *Seishin Shinkeigaku Zasshi*. 2014;116(3): 212–218.
25. “Fukushima-1” NPP Accident: radiological consequences and lessons. Ed. by acad. of RAS GG Onishchenko and prof. AYu Popova. St-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after prof. PV Ramzaev. 2021; 388 p. (In Russian).
26. Bronskiy VI, Tolkanets SV. The results of the psychosomatic screening of the population evacuated from the exclusion zone affected by the Chernobyl disaster. *Zdravookhranenie = Healthcare*. 2000;7: 45–48. (In Russian).
27. Burtovaya EYu. Mental health of residents of radioactively contaminated territories of the Chelyabinsk region in the late period after the resettlement. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 18–24. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-18-24.
28. Arkhagelskaya GV, Zykova IA, Zelentsova SA. The difficulties of informing the population on the issues of radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(2): 42–49. (In Russian).
29. Akleev AV, Gritsenko VG, Marchenko TA. Social-psychological consequences of emergency exposure of the population of Ural region. Moscow; 2008. 351 p. (In Russian).
30. Marchenko TA, Melnitskaya TB, Simonov AV, Apanasyuk ON. Information and psychological protection of the population living on radioactive polluted territories: principles, methods, experience. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti=Civil Security Technology*. 2014;11(2): 50–56. (In Russian).
31. Rumyantseva GM, Chinkina OV. Problems of perception and subjective assessment of risk from ionizing radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(3): 50–58. (In Russian).
32. Savelieva MV, GudzyuV. Factors of the psychological status in victims of radiation accidents, which mitigate development of psychosomatic disorders in the long term. *Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situacijah = Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2022;(1): 117–125. (In Russian). DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-1-117-125.
33. Kashiwazaki Y, Takebayashi Y, Murakami M. Relationships between radiation risk perception and health anxiety, and contribution of mindfulness to alleviating psychological distress after the Fukushima accident: cross-sectional study using a path model. *PLoS ONE*. 2020;15(7): e0235517. DOI: 10.1371/journal.pone.0235517.
34. Arkhangel'skaya GV, Zelentsova SA, Vishnyakova NM, Khramtsov EV, Varfolomeeva KV, Sokolov NV, et al. Risk-communication issues in radiation safety: evaluation of public awareness in St. Petersburg and the Leningrad region on the activities of the nuclear industry and public understanding of the hazards. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 36–45. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-36-45.
35. Biblin AM, Arkhangel'skaya GA, Zelentsova SA, Khramtsov EV, Akhmatdinov RR, Sokolov NV, et al. Risk-communication issues in radiation safety: preferences of the public in the Leningrad and Murmansk regions on the sources of information. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 60–73. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-60-73.

36. Sokolov NV, Biblin AM, Repin LV, Rekhtina LS. Risk-communication issues in radiation safety: Mass consciousness about radiation and nuclear industry based on the results of a sociological research in St. Petersburg, the Leningrad region and the Murmansk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 45–56. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-45-56.
37. Burtovaya EYu, Akleev AV, Shalaginov SA. Psychosocial aspects of resettlement of the village of Muslumovo Chelyabinsk region exposed to radiation as a result of emergencies at the PA "Mayak". *Medico-biologicheskie i socialno-psichologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh = Medical-biological and socio-psychological problems of security in emergency situations*. 2011;2: 105–108. (In Russian).
38. Rumyantseva GM, Levina TM, Chinkina OV, Stepanov AL, Sokolova TN. Peculiarities of psychological-psychiatric after-effects of radiative accidents. *Ekologiya cheloveka = Human ecology*. 2007;9: 42–47. (In Russian).
39. Rumyantseva GM, Muravyov AI, Levina TM, Sidoryuk OV. Occurrence of mental disorders in population affected by radiation accident: structure, dynamics, risk factors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(2): 21–26. (In Russian).
40. Akleev AV, Novoselov VN, Shalaginov SA, Burtovaya EYu, Bushmanov AYU, Grebenyuk AN. Techa: before and after the nuclear project. Chelyabinsk: Book; 2015. 352 p.
41. Burtovaya EYu, Akleyev AV, Barkovskaya LP, Kantina TE, Litvinchuk EA. Incidence of mental disorders in the population of municipal areas of the Chelyabinsk region in the remote period after accidental radioactive contamination. *Medico-biologicheskie i socialno-psichologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh = Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2021;(1): 22–30. (In Russ.) DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-1-22-30.
42. Slovic P. The perception gap: radiation and risk. *Journal Bulletin of the Atomic Scientists*. 2012;68(3): 67–75. DOI: 10.1177/0096340212444870.

Received: November 11, 2024

For correspondence: Elena Yu. Burtovaya – Candidate of Medical Sciences, Deputy Director for Science, Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical-Biological Agency (Vorovsky Str., 68A, building 1, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: burt@urcrm.ru)

ORCID: 0000-0002-1260-7745

Tatyana E. Kantina – Junior Researcher at the Laboratory of Ecological Pathopsychology, Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0001-6001-4111

Elena A. Litvinchuk – Junior Researcher at the Laboratory of Ecological Pathopsychology, Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0003-0061-7134

For citation: Burtovaya E.Yu., Kantina T.E., Litvinchuk E.A. Characteristics of factors affecting the mental health of exposed persons in the long-term period after radiation exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 76–84. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-76-84

Анализ уровней медицинского облучения населения Российской Федерации в 2023 г. с использованием актуализированной формы № 3-ДОЗ

А.В. Водоватов^{1,2}, Е.А. Косарлукова¹, А.М. Библин¹, Р.Р. Ахматдинов¹, А.А. Братилова¹

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

Введение: Для успешного решения задач по оптимизации радиационной защиты при медицинском облучении необходимо обладать информацией об уровнях облучения пациентов и структуре лучевой диагностики в медицинских организациях в Российской Федерации. Основным источником данных по уровням облучения пациентов и структуре лучевой диагностики является форма государственного статистического наблюдения №3-ДОЗ единой системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан. Целью настоящего исследования являлась комплексная оценка результатов заполнения формы № 3-ДОЗ за 2023 год. **Материалы и методы:** В работе использовались данные формы № 3-ДОЗ на уровне субъектов Российской Федерации, полученные из Федерального банка данных по индивидуальным дозам облучения граждан при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических процедур. **Результаты исследования и обсуждение:** Коллективная доза от медицинского облучения у взрослого населения увеличилась на 34 % по сравнению с 2022 г. Максимальный рост коллективных доз наблюдался для рентгенографических (81 %), радионуклидных (49 %) и интервенционных (57 %) исследований. Впервые за последние пять лет рост коллективных доз для рентгенорадиологических процедур не сопровождался идентичным ростом числа исследований, что свидетельствует о росте средних и индивидуальных эффективных доз пациентов. Средняя эффективная доза за счет медицинского облучения на одного жителя Российской Федерации в 2023 г. увеличилась более чем в полтора раза: 1,12 мЗв по сравнению с 0,86 мЗв в 2022 г. Рост коллективных доз для различных видов лучевой диагностики обусловлен ростом средних эффективных доз для различных рентгенорадиологических процедур в регионах Российской Федерации. Максимальные различия в средних эффективных дозах наблюдаются для рентгенографических процедур (рост вплоть до 2,5 раз по сравнению с 2022 г.). **Заключение:** Данные изменения средних эффективных доз могут быть обусловлены как ошибками в расчетах эффективных доз и заполнения формы №3-ДОЗ, так и объективными изменениями в аппаратном парке и/или протоколах проведения рентгеновских процедур. При этом ряд регионов Российской Федерации, напротив, представил anomalно низкие средние эффективные дозы. Для идентификации причин anomalно высоких и/или низких эффективных доз при проведении процедур лучевой диагностики необходима разработка и апробация методики верификации данных, представляемых в форме №3-ДОЗ.

Ключевые слова: ЕСКИД, форма №3-ДОЗ, медицинское облучение, пациенты, коллективная доза, эффективная доза, рентгенорадиологические процедуры.

Analysis of medical exposure levels of the Russian Federation population in 2023 using the updated form No. 3-DOZ

Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Elena A. Kosarlukova¹, Artem M. Biblin¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹, Anzhelika A. Bratilova¹

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

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

Aleksandr V. Vodovатов

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

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

Introduction: To successfully address the challenges of optimizing radiation protection during medical exposure, it is essential to have information on patient exposure levels and the structure of diagnostic radiology in medical organizations across the Russian Federation. **Materials and Methods:** The primary source of data on patient exposure levels and the structure of diagnostic radiology is the Form No. 3-DOZ, a part of the Unified state statistical monitoring system for controlling and recording individual radiation doses of citizens. The aim of this study was to comprehensively evaluate the results of completing Form No. 3-DOZ for 2023. The study utilized data from the Form No. 3-DOZ at the level of the constituent entities of the Russian Federation, obtained from the Federal Database on Individual Radiation Doses of Citizens during medical diagnostic X-ray radiological procedures. **Results and Discussion:** The collective dose from medical exposure among the adult population increased by 34 % in 2023 compared to 2022. The most significant increases in the collective doses were observed for radiographic (81 %), radionuclide (49 %), and interventional (57 %) procedures. For the first time in the past five years, the increase in collective doses for X-ray radiological procedures was not accompanied by a corresponding increase in the number of procedures, indicating a rise in average and individual effective doses for patients. The average effective dose per resident of the Russian Federation due to medical exposure in 2023 increased by more than one and a half times: 1.12 mSv compared to 0.86 mSv in 2022. The increase in collective doses for various types of diagnostic radiology is driven by the rise in average effective doses for different X-ray radiological procedures across regions of the Russian Federation. The greatest variations in average effective doses were observed for radiographic procedures (an increase of up to 2.5 times in 2023 compared to 2022). **Conclusion:** These changes in average effective doses may be attributed to errors in calculating effective doses and completing the Form No. 3-DOZ, as well as to objective changes in the equipment fleet and/or protocols for conducting X-ray procedures. At the same time, several regions of the Russian Federation reported anomalously low average effective doses. To identify the reasons for abnormally high and/or low effective doses during diagnostic radiology procedures, it is necessary to develop and test a methodology for verifying the data submitted in the Form No. 3-DOZ.

Key words: ISDCR, Form No. 3-DOZ, medical exposure, patients, collective dose, effective dose, X-ray radiological procedures.

Введение

Медицинское облучение на протяжении последних лет является крупнейшим техногенным фактором воздействия ионизирующего излучения на население Российской Федерации [1]. На медицинское облучение приходится около 20 % вклада в общую коллективную дозу от всех источников. В отличие от всех остальных видов облучения, медицинским можно управлять, поддерживая дозы облучения пациентов на приемлемом уровне [2, 3]. Приемлемой дозой облучения в таком случае является минимальная доза, при которой обеспечивается получение необходимой диагностической информации, или достижение необходимого терапевтического эффекта [4]. Управление дозами медицинского облучения на практике реализуется посредством оптимизации радиационной защиты пациента и применения программ обеспечения качества^{1,2}.

Для успешного решения задач по оптимизации радиационной защиты при медицинском облучении необходимо обладать информацией об уровнях облучения пациентов и структуре лучевой диагностики в медицинских организациях в Российской Федерации на различных уровнях: отдельного рентгеновского аппарата, отдельной медицинской организации, субъекта Российской Федерации, всей Российской Федерации [5]. Анализ трендов медицинского облучения и структуры лучевой диагностики, обоснование принятия управленческих решений по управлению дозами медицинского облучения возможны только на основе достоверной информации, прошедшей необходимую верификацию [5, 6].

Introduction

Medical exposure has been the largest human-made source of ionizing radiation exposure for the population of the Russian Federation in recent years [1]. Approximately 20 % of the total collective dose from all sources is attributed to medical exposure. Unlike other types of radiation exposure, medical exposure can be managed by ensuring that patient radiation doses remain at an acceptable level [2, 3]. The acceptable dose in this case is the minimal dose necessary to obtain the required diagnostic information or achieve the desired therapeutic effect [4]. The management of medical radiation doses is implemented through optimizing radiation protection of patients and implementing quality assurance programs^{1,2}.

To achieve effective optimization of radiation protection from medical exposure, it is essential to collect accurate information on patient doses and the structure of X-ray diagnostics in the Russian Federation at different levels, including individual X-ray units, medical facilities, regional and national level [5]. The analysis of trends of medical exposure and structure of X-ray diagnostics, as well as the justification for decision-making in radiation dose management, is only possible when reliable, verified data are available [5, 6].

At present, the primary source of data on patient doses and the structure of X-ray diagnostics in the Russian Federation is Form No. 3-DOZ, a state statistical surveillance tool within the Unified System for Monitoring and Recording Individual Radiation Doses of Citizens (ESKID)³. This form has been

¹Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 N 40 (ред. от 16.09.2013) «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 "Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» (вместе с «СП 2.6.1.2612-10. ОСПОРБ-99/2010. Санитарные правила и нормативы...») (Зарегистрировано в Минюсте России 11.08.2010 N 18115) [Sanitary rules and norms SP2.6.1.2612-10 "Basic sanitary rules of the provision of the radiation safety (OSPORB 99/2010)". (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 11.08.2010 N 41970) (In Russ.)]

²СанПин 2.6.1.2891-11 «Требования радиационной безопасности при производстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации (утилизации) медицинской техники, содержащей источники ионизирующего излучения» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2891-11 "Radiation safety requirements for the production, operation and decommissioning (disposal) of medical equipment containing sources of ionizing radiation" (In Russ.)]

³Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 31 июля 2000 года № 298 «Об утверждении Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 298 of 31 July 2000 'On Approval of the Regulations on the Unified System for Monitoring and Recording Individual Radiation Doses of Citizens' (In Russ.)]

В настоящий момент в Российской Федерации основным источником данных по уровням облучения пациентов и структуре лучевой диагностики является форма государственного статистического наблюдения №3-ДОЗ единой системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД)³. Данная форма действует с 1996 г. и позволяет на регулярной (ежегодной) основе собирать необходимые данные из всех медицинских организаций страны. Аналоги формы №3-ДОЗ в международной практике отсутствуют. Основным на текущий момент недостатком формы №3-ДОЗ является отсутствие механизмов верификации представленных данных по дозам облучения пациентов [5, 7].

В 2022 году форма №3-ДОЗ была актуализирована и модифицирована с учетом изменений в структуре отечественной лучевой диагностики. Процедуры лучевой диагностики с высокими дозами облучения пациентов выделены в отдельные столбцы и/или графоклетки. Также впервые в отечественной и международной практике на государственном уровне организован отдельный учет рентгенорадиологических процедур, выполненных детским пациентам. Для повышения достоверности собираемых данных из программного обеспечения для заполнения формы №3-ДОЗ была исключена возможность использования типовых (стандартных) эффективных доз пациентов для расчета коллективной дозы. В 2023 г. сбор данных по медицинскому облучению от всех организаций проводился с использованием новой формы №3-ДОЗ [5, 6].

Изменения в форме №3-ДОЗ, безусловно, приведут к изменению в качестве и объемах собираемых данных. Необходимо проанализировать изменения в структуре лучевой диагностики, коллективной дозе за счет медицинского облучения и средних эффективных дозах для наиболее распространенных рентгенорадиологических процедур, по результатам сбора данных 2023 г.

Цель исследования – комплексная оценка результатов заполнения формы № 3-ДОЗ за 2023 год.

Материалы и методы

В работе использовались данные формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований» на уровне субъектов Российской Федерации, полученные из Федерального банка данных по индивидуальным дозам облучения граждан при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических процедур за 2023 год.

В качестве основных проанализированных показателей выбрали коллективную дозу от медицинского облучения (чел.-Зв), число диагностических рентгенорадиологических исследований, и среднюю эффективную дозу (СЭД) за процедуру лучевой диагностики (мЗв). Расчет СЭД за процедуру проводили с использованием выражения.

$$СЭД = \frac{КД}{n} \cdot 1000, \text{ мЗв}$$

где КД – коллективная доза от выбранного метода лучевой диагностики или от выбранной рентгенорадиологической процедуры, чел.-Зв; n – число рентгенорадиологических процедур для выбранного метода лучевой диагностики или выбранной рентгенорадиологической процедуры, шт.

used since 1996 and allows for the systematic (annual) collection of required data from all medical facilities across the country. There are no direct international analogs to Form No. 3-DOZ. However, one of the key drawbacks of the form is the absence of verification mechanisms for the reported patient dose data [5, 7].

In 2022, Form No. 3-DOZ was updated and modified to reflect changes in the structure of the national X-ray diagnostics. High-dose X-ray procedures were categorized separately. Additionally, for the first time in both national and international practice, a state-level registry for pediatric X-ray procedures was introduced. To enhance data reliability, the software for filling out Form No. 3-DOZ was revised to prevent the use of standard (typical) effective dose values for collective dose calculations. In 2023, data collection on medical exposure from all facilities was conducted using the updated Form No. 3-DOZ [5, 6].

The changes in Form No. 3-DOZ will inevitably lead to changes in the quality and volume of collected data. It is necessary to analyze changes in the structure of X-ray diagnostics, collective doses from medical exposure, and average effective doses for the most common X-ray procedures based on the 2023 data collection results.

The objective of this study is to conduct a comprehensive assessment of the results obtained from Form No. 3-DOZ for 2023.

Materials and Methods

The study utilized data from the federal state statistical reporting form No. 3-DOZ, "Information on Patient Radiation Doses During Medical X-ray and X-ray Examinations" at the level of subjects of the Russian Federation. These data were obtained from the Federal Database on Individual Radiation Doses of Citizens during medical diagnostic X-ray procedures and in nuclear medicine in 2023.

The primary analyzed indicators included the collective dose from medical exposure (man -Sv), the number of diagnostic X-ray procedures performed, and the average effective dose (AED) per diagnostic procedure (mSv). The AED per procedure was calculated using the following formula:

$$AED = \frac{CD}{n} \cdot 1000, \text{ mSv}$$

where CD – collective dose from the selected X-ray diagnostic method or specific X-ray procedure, measured in person-Sv; n – number of X-ray procedures for the selected X-ray diagnostic method or specific X-ray procedure, measured in units.

Data from Tables 1100 and 2100 for collective dose and number of radiology procedures for X-ray procedures, and Table 3000 for radionuclide procedures were used to analyze the 2022 outdated form No. 3-DOZ. Data from Tables 2100 and 2200 for collective dose and number of X-ray procedures for adult patients, 2300 and 2400 for pediatric patients, and Tables 3100 and 3200 for radionuclide diagnostic procedures for both adult and pediatric patients were used for the analysis of the updated form No. 3-DOZ for 2023.

To calculate the average effective dose per inhabitant of the Russian Federation, the total collective dose from all types of radiation diagnostics was divided by the population of the Russian Federation in 2023 (143.8 million inhabitants⁴).

⁴ Доступно по ссылке: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/WVP_na_dushu_s1995-2023.xls (Дата обращения: 01.02.2025) [Available from: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/WVP_na_dushu_s1995-2023.xls (Accessed: February 01.02.2025) (In Russ.)]

Для анализа неактуализированной формы №3-ДОЗ за 2022 г. использовали данные из таблиц 1100 и 2100 для коллективной дозы и числа рентгенорадиологических процедур соответственно для процедур рентгеновской диагностики, и таблицы 3000 – для процедур радионуклидной диагностики. Для анализа актуализированной формы №3-ДОЗ за 2023 г. использовали данные из таблиц 2100 и 2200 для коллективной дозы и числа рентгеновских процедур соответственно для взрослых пациентов; 2300 и 2400 – для коллективной дозы и числа рентгеновских процедур соответственно для детских пациентов; таблиц 3100 и 3200 – для радионуклидных диагностических исследований для взрослых и детских пациентов соответственно.

Для расчета средней эффективной дозы на одного жителя Российской Федерации суммарную коллективную дозу от всех видов лучевой диагностики разделили на численность населения Российской Федерации в 2023 г. (143,8 млн жителей⁴).

Для анализа применяли методы описательной статистики с использованием программного обеспечения SPSS Statistics и Microsoft Excel. Сравнение отдельных параметров между группами выполнялось с помощью непараметрического U-критерия Манна-Уитни. Различия считали достоверными с $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Результаты оценки изменения структуры лучевой диагностики и коллективной дозы за счет медицинского диагностического облучения в Российской Федерации представлены в таблицах 1 и 2 соответственно. За 2023 г. представлены объединенные данные для взрослых и детских пациентов. Результаты, представленные в таблице 1, демонстрируют незначительное увеличение числа диагностических рентгенорадиологических процедур в 2023 г. В 2023 году число всех диагностических рентгенорадиологических процедур возросло до 297 миллионов по сравнению с 283 миллионами в 2022 году (рост составил 5 %).

Рост числа процедур был зафиксирован для всех видов лучевой диагностики (табл. 1) за исключением флюорографии (снижение на 3 %). Число рентгенографических процедур увеличилось на 8 %, процедур компьютерной томографии и интервенционных исследований – на 8 % и 12 % соответственно. Число диагностических радионуклидных исследований также выросло на 18 %. Максимальный рост был зафиксирован для процедур, отнесенных к категории «Прочие», – на 178 %. Это может быть объяснено появлением в новой форме №3-ДОЗ четких критериев отнесения процедур к данной категории [6].

Коллективная доза за счет диагностического медицинского облучения в 2023 году выросла с 123 тыс. чел.-Зв в 2022 году до 182 тыс. чел.-Зв (рост на 34 %). Коллективные дозы увеличились для всех видов лучевой диагностики за исключением процедур, отнесенных к категории «Прочие» (что, как уже было отмечено ранее, объясняется четким отнесением конкретного вида лучевой диагностики с фиксированными дозами за процедуру к данной категории). Максимальный рост коллективных доз наблюдался для рентгенографических (81 %), радионуклидных (49 %) и интервенционных (57 %) исследований. Впервые за последние пять лет рост коллективных доз для рентгенорадиологических процедур не сопровождался идентичным ростом числа исследований, что свидетельствует о росте средних и индивидуальных эффективных доз пациентов [7].

Структура лучевой диагностики в 2023 г. не претерпела значительных изменений. В ней по-прежнему преобладают рентгенография (2023 г. – 65,3 %, 2022 г. – 63 %) и флюорография (2023 г. – 24,4 %, 2022 г. – 27 %). Вклад компьютерной томографии составил 8,6%; все остальные высокотехнологичные методы лучевой диагностики вносят менее 2 % вклада. Детальные сведения о структуре лучевой диагностики в 2023 г. представлены на рисунке 1.

Descriptive statistical methods were used for analysis, employing SPSS Statistics and Microsoft Excel software. The Mann-Whitney U test was applied to compare different parameters between groups, with statistical significance set at $p < 0.05$.

Results and discussion

The results of the assessment of changes in the structure of X-ray diagnostics and collective dose from diagnostic medical exposure in the Russian Federation are presented in Tables 1 and 2, respectively. For 2023, combined data for adult and pediatric patients is presented.

The results presented in Table 1 demonstrate a slight increase in the number of diagnostic X-ray procedures in 2023. The total number of all diagnostic X-ray procedures increased to 297 million in 2023 compared to 283 million in 2022 (a 5 % increase).

An increase in the number of procedures was observed for all types of radiological diagnostics (Table 1), except for fluorography, which showed a 3 % decrease. The number of radiographic procedures increased by 8 %, computed tomography (CT) and interventional examinations by 8 % and 12 %, respectively. The number of diagnostic nuclear medicine procedures also increased by 18 %. The highest increase was recorded for procedures categorized as "Other" (178 %), which can be explained by the introduction of clear classification criteria in the new Form No. 3-DOZ [6].

The collective dose from diagnostic medical exposure in 2023 increased from 123,000 person-Sv in 2022 to 182,000 person-Sv (a 34 % increase). Collective doses increased for all types of X-ray diagnostics except for procedures classified as "Other" (which, as previously noted, is explained by the clear classification of specific X-ray imaging modalities with fixed doses in this category). The highest increase in collective doses was observed for radiographic (81 %), nuclear medicine (49 %), and interventional (57 %) procedures. For the first time in the last five years, the increase in collective doses for X-ray procedures was not accompanied by an identical increase in the number of procedures, indicating an increase in average and individual effective patient doses [7].

The structure of X-ray diagnostics in 2023 did not change significantly. It continues to be dominated by radiography (65.3 % in 2023 vs. 63 % in 2022) and fluorography (24.4 % in 2023 vs. 27 % in 2022). Computed tomography accounted for 8.6 %, while all other high-tech X-ray diagnostic methods contributed less than 2 %. Detailed information on the structure of X-ray diagnostics in 2023 is presented in Figure 1.

The change in the ratio of fluorographic and radiographic examinations is due to the introduction of clearer rules for filling out Form No. 3-DOZ. In particular, fluorographic examinations include only chest examinations conducted as part of preventive screenings on digital or analog fluorographs and X-ray units. Examinations of other anatomical areas are properly classified as radiographic examinations in accordance with the new instructions for filling out Form No. 3-DOZ starting from 2023. Detailed data on the structure of the collective dose from medical diagnostic exposure in 2023 are provided in Figure 2. The highest contributions to the collective dose were from computed tomography (69.1 % in 2023 vs. 74 % in 2022), radiography (11.9 % in 2023 vs. 9 % in 2022), interventional procedures (8.2 % in 2023 vs. 7 % in 2022), and nuclear medicine procedures (5.3 % in 2023 vs. 5 % in 2022).

Таблица 1

Изменение числа рентгенорадиологических процедур за период 2022-2023 гг.

[Table 1]

Change in the number of radiological procedures during the period 2022-2023]

Вид лучевой диагностики [Imaging modality]	Число рентгенорадиологических процедур, тыс. шт. [Number of X-ray procedures, thousand]		% изменения в 2023 г. [% of change in 2023]
	2022	2023	
Флюорография [Fluorography]	74885	72524	-3
Рентгенография [Radiography]	180491	194333	8
Рентгеноскопия [Fluoroscopy]	1093	1139	4
Компьютерная томография [Computed tomography]	23627	25631	8
Интервенционные исследования [Interventional examinations]	1770	1989	12
Радионуклидная диагностика [Diagnostic nuclear medicine]	719	851	18
Прочие [Other]	383	1063	178
Всего [Total]	282967	297531	5

Таблица 2

Изменение коллективной дозы от медицинского облучения в период 2022-2023 гг.

[Table 2]

Change in the collective dose from medical radiation during the period 2022-2023]

Вид лучевой диагностики [Imaging modality]	Коллективная доза, чел –Зв Collective dose, man. - Sv		% изменения 2023 г. [% of change in 2023]
	2022	2023	
Флюорография [Fluorography]	4024	5644	40
Рентгенография [Radiography]	10829	19652	81
Рентгеноскопия [Fluoroscopy]	2547	3141	23
Компьютерная томография [Computed tomography]	90880	114229	26
Интервенционные исследования [Interventional examinations]	8654	13611	57
Радионуклидная диагностика [Diagnostic nuclear medicine]	5866	8743	49
Прочие [Other]	333	334	0,3
Всего [Total]	123133	165354	34

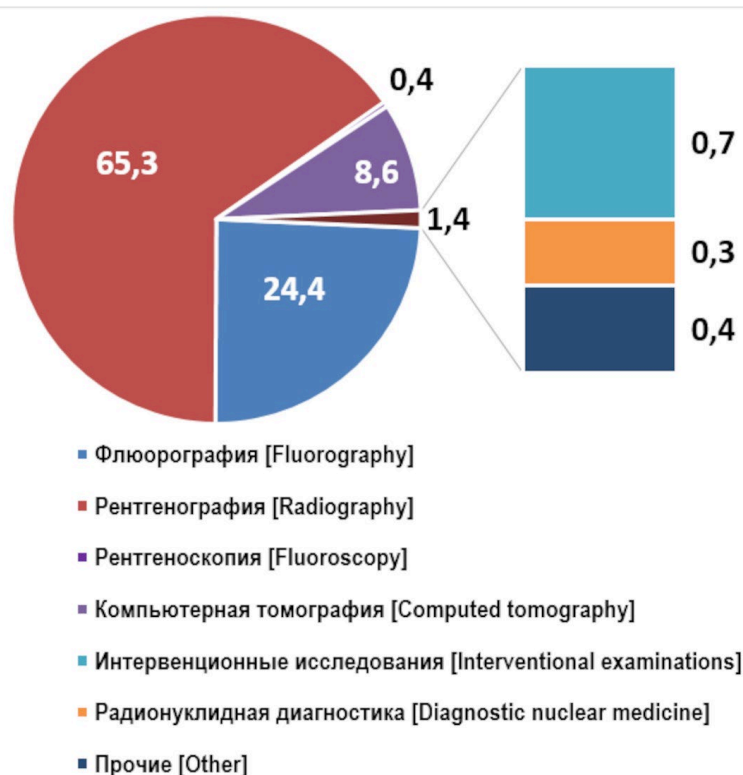


Рис. 1. Структура лучевой диагностики в Российской Федерации в 2023 г.
[Fig. 1. Structure of radiological diagnostics in the Russian Federation in 2023]

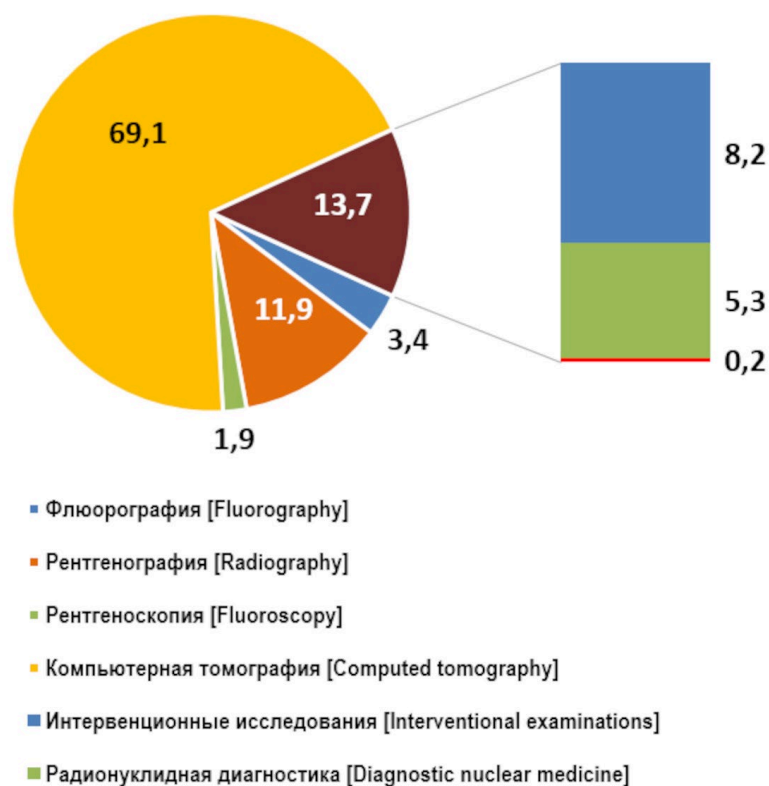


Рис. 2. Структура коллективной дозы за счет медицинского облучения в Российской Федерации в 2023 г.
[Fig. 2. Structure of collective dose from medical exposure in the Russian Federation in 2023]

Изменение соотношения флюорографических и рентгенографических исследований обусловлено внедрением более четких правил по заполнению формы №3-ДОЗ. В частности, к флюорографическим исследованиям относятся только исследования органов грудной клетки, выполненные в рамках профилактических исследований на цифровых или аналоговых флюорографах и рентгеновских аппаратах; исследования прочих анатомических областей в соответствии с новой инструкцией по заполнению формы №3-ДОЗ с 2023 г. правильно учитываются как рентгенографические исследования [6].

Детальные сведения о структуре коллективной дозы за счет диагностического медицинского облучения в 2023 г. представлены на рисунке 2. Наибольший вклад в коллективную дозу в 2023 г. внесли: компьютерная томография – 69,1 % (2022 г. – 74 %), рентгенография – 11,9 % (2022 г. – 9 %), интервенционные исследования – 8,2 % (2022 г. – 7 %) и радионуклидные исследования – 5,3 % (2022 г. – 5 %).

Основным достоинством актуализированной формы №3-ДОЗ является возможность отдельного учета рентгено-радиологических процедур, выполненных детским пациентам. Вклад данных процедур в структуру лучевой диагностики и коллективной дозы от диагностических рентгено-радиологических исследований представлен на рисунках 3 и 4 соответственно.

Результаты анализа данных, полученных в 2023 г., показывают, что детям выполняется 12 % от общего числа всех рентгенографических исследований и 2–5 % от всех КТ-исследований, интервенционных (специальных) исследований и диагностических радионуклидных исследований. При этом вклад детских рентгено-радиологических исследований в коллективную дозу от медицинского облучения составляет в среднем всего 3 % (от 9 % при проведении рентгенографии до 2–3 % для других видов лучевой диагностики), что может быть объяснено преимущественным использованием низкодозовых протоколов проведения исследований, оптимизированных под педиатрическую практику.

Средняя эффективная доза за счет медицинского облучения на одного жителя Российской Федерации в 2023 г. увеличилась более чем в полтора раза: 1,12 мЗв по сравнению с 0,86 мЗв в 2022 г. Аналогичное изменение зафиксировано и для средней эффективной дозы на одну рентгено-радиологическую процедуру (рисунок 5).

Максимальные годовые эффективные дозы медицинского облучения в среднем на одного жителя в 2023 году были зарегистрированы в Краснодарском крае (2,73 мЗв), Санкт-Петербурге (1,98 мЗв), Москве (1,97 мЗв), Хабаровском крае (1,63 мЗв), Иркутской (1,61 мЗв) и Магаданской (1,52 мЗв) областях. В 29 субъектах Российской Федерации годовые эффективные дозы медицинского облучения в среднем на одного жителя в 2023 году превысили 1 мЗв.

Значения средних эффективных доз в 2023 г. являются максимальными за последние 5 лет и превосходят аналогичные показатели в период пандемии COVID-19. Для определения причин такого изменения целесообразно проанализировать выборки средних эффективных доз для регионов Российской Федерации, полученных по результатам измерений, для наиболее распространенных рентгеновских процедур в 2022 и 2023 гг. Результаты анализа представлены на рисунках 6–9 для рентгенографических, рентгеноскопических и компьютерно-томографических процедур (без контраста и с контрастом) соответственно. Данные за 2022 г. представлены без деления по возрастным категориям пациентов в связи с тем, что сбор данных для детских пациентов начался только с 2023 г.

Результаты, представленные на рисунках 6–9, позволяют сделать следующие выводы:

- для всех рассмотренных рентгеновских процедур СЭД у детских пациентов достоверно ниже (тест Манна-Уитни, $p < 0,05$) по сравнению с СЭД у взрослых;
- по сравнению с 2022 в 2023 году СЭД у взрослых пациентов выросли для всех рассмотренных рентгеновских процедур, за исключением компьютерной томографии органов грудной клетки. Результаты сравнения представлены в таблице 3.

A key advantage of the updated Form No. 3-DOZ is the ability to separately account for X-ray procedures performed on pediatric patients. The contribution of these procedures to the structure of radiation diagnostics and collective dose from diagnostic X-ray radiologic examinations is presented in Figures 3 and 4, respectively.

The analysis of data obtained in 2023 shows that pediatric patients account for 12 % of all radiographic procedures and 2–5 % of all CT scans, interventional procedures, and diagnostic nuclear medicine procedures. However, the contribution of pediatric X-ray procedures to the collective dose from medical exposure is, on average, only 3 % (ranging from 9 % for radiography to 2–3 % for other types of X-ray diagnostics). This can be explained by the predominant use of low-dose imaging protocols optimized for pediatric practice.

The average effective dose from medical exposure per capita in the Russian Federation has increased by a factor of 1.5 in 2023: 1.12 mSv compared to 0.86 mSv in 2022. A similar change was recorded for the average effective dose per X-ray procedure (Figure 5).

The highest annual effective medical exposure doses per capita in 2023 were recorded in Krasnodar Krai (2.73 mSv), Saint Petersburg (1.98 mSv), Moscow (1.97 mSv), Khabarovsk Krai (1.63 mSv), Irkutsk Oblast (1.61 mSv), and Magadan Oblast (1.52 mSv). In 29 regions of the Russian Federation, the annual effective medical exposure doses per capita exceeded 1 mSv in 2023.

The average effective dose values in 2023 are the highest in the last five years and exceed those recorded during the COVID-19 pandemic. To determine the causes of these changes, it is advisable to analyze samples of average effective doses for regions of the Russian Federation obtained from measurements for the most common X-ray procedures in 2022 and 2023. The results of this analysis are presented in Figures 6–9 for radiographic, fluoroscopic, and computed tomography procedures (both with and without contrast). The 2022 data is presented without age group differentiation, as data collection for pediatric patients began only in 2023.

The results presented in Figures 6–9 led to the following conclusions:

- For all considered X-ray procedures, the effective dose in pediatric patients is significantly lower (Mann-Whitney test, $p < 0.05$) compared to that in adults;
- Compared to 2022, the effective dose in adult patients increased for all considered X-ray procedures in 2023, except for chest CT. The comparative results are presented in Table 3.

As shown in Table 3, the most significant differences were observed for chest radiography, where the effective dose increased by a factor of 2.5 in 2023. The decrease in the effective dose for CT can be explained by the separate accounting of procedures using contrast agents, which led to the exclusion of such high-dose procedures from the overall sample. The increase in effective dose for fluoroscopic procedures and CT of the skull is due to clearer classification criteria. Specifically, dental procedures performed on cone-beam CT scanners were reassigned from the "skull" category to the "teeth" category.

- Some regions of the Russian Federation exhibit abnormally low effective doses (Figures 6–9). Effective dose values, at which a quality X-ray examination is practically impossible, should be considered anomalous.

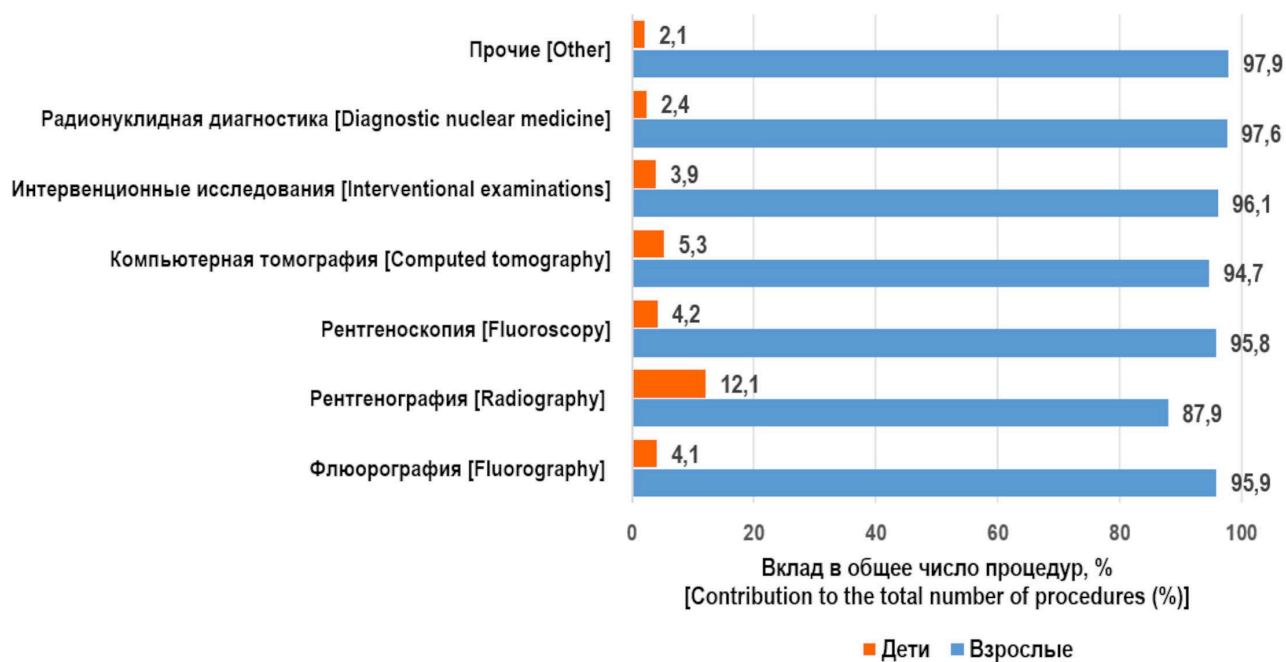


Рис. 3. Соотношение вклада рентгенорадиологических процедур, выполненных взрослым и детским пациентам, в структуру лучевой диагностики в 2023 г.

[Fig. 3. The ratio of the contribution of radiological procedures performed on adult and pediatric patients to the structure of radiological diagnostics in 2023]

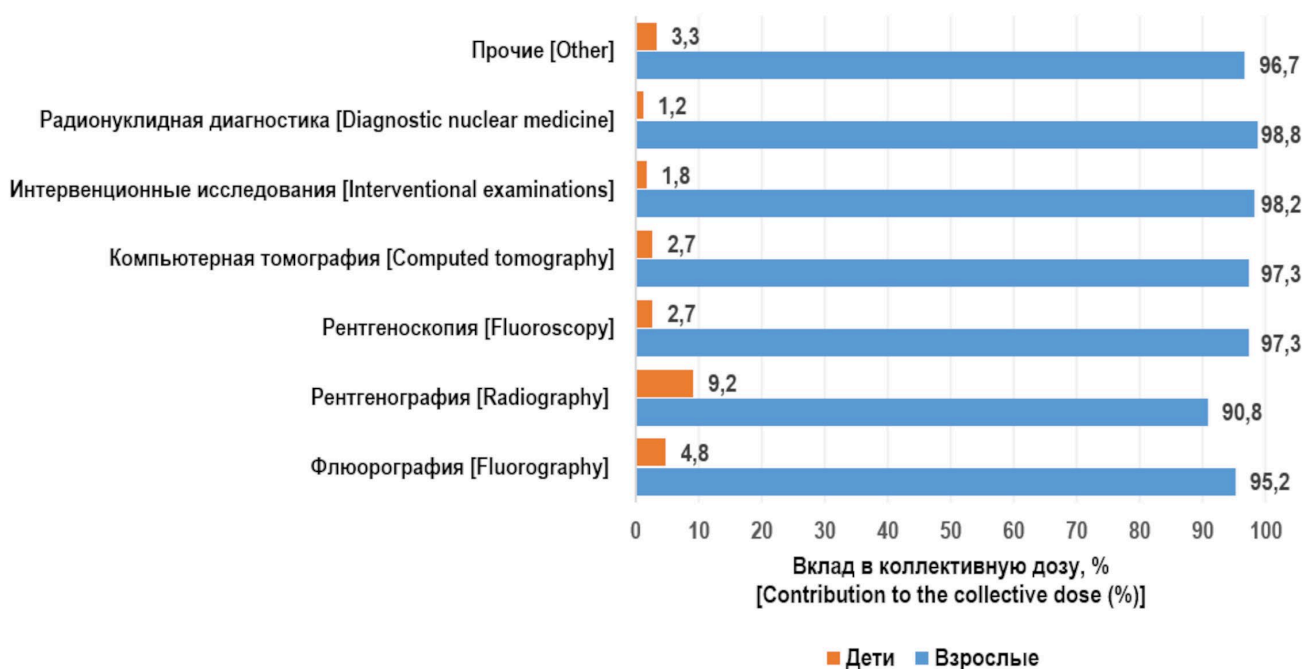


Рис. 4. Соотношение вклада рентгенорадиологических процедур, выполненных взрослым и детским пациентам, в структуру коллективной дозы за счет медицинского облучения в 2023 г.

[Fig. 4. The ratio of the contribution of radiological procedures performed on adult and pediatric patients to the structure of the collective dose from medical exposure in 2023]

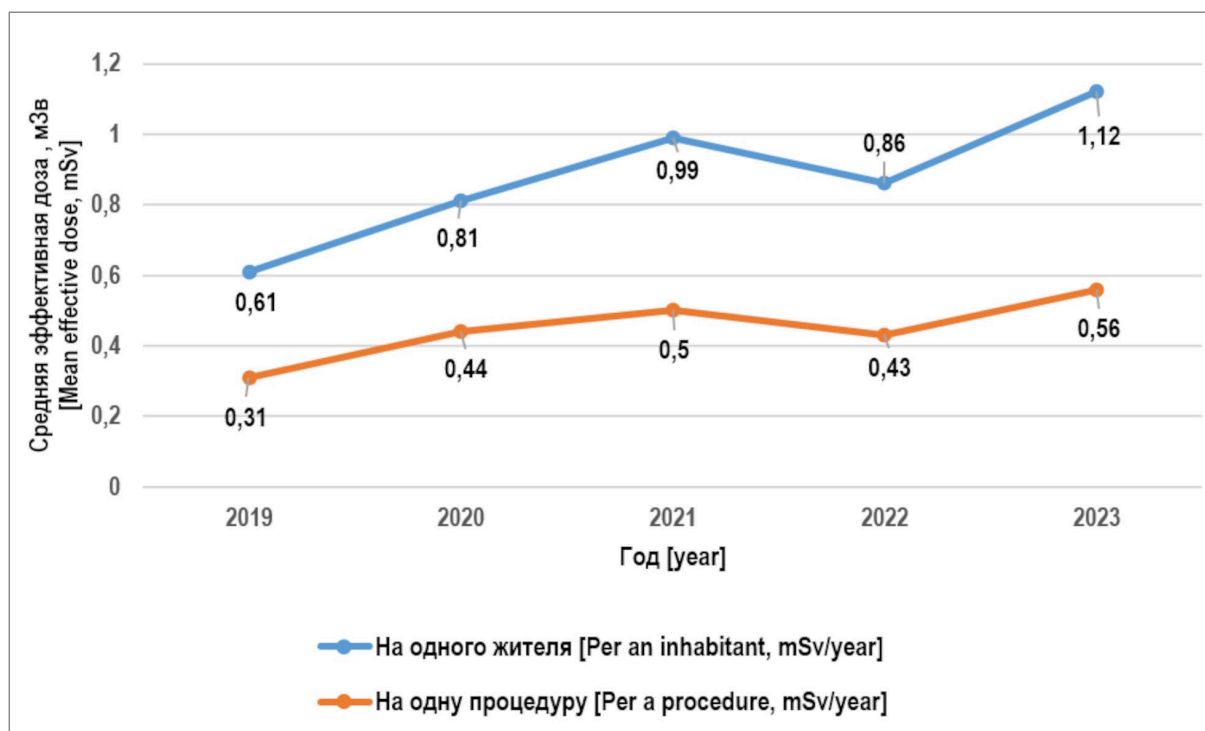


Рис. 5. Изменение средней эффективной дозы за счет медицинского облучения на одного жителя Российской Федерации и на одну процедуру за период 2019-2023 гг.
[Fig. 5. Changes in the average effective dose from medical exposure per capita in the Russian Federation and per procedure during the period 2019–2023]

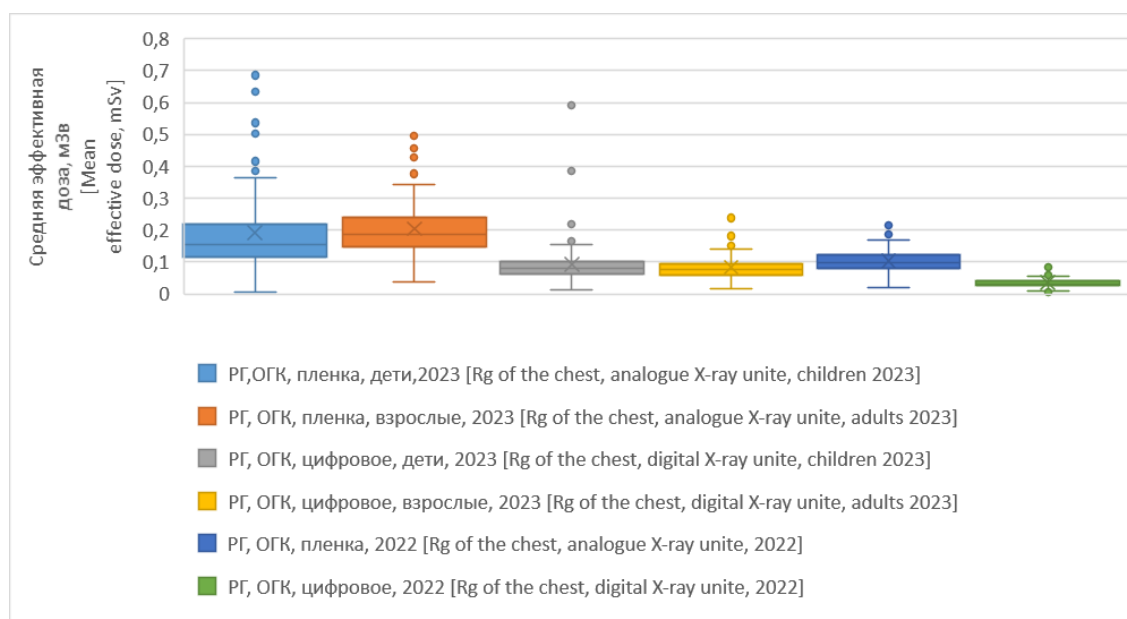


Рис. 6. Диапазоны СЭД для рентгенографии органов грудной клетки (ОГК), выполненной на пленочных и цифровых рентгеновских аппаратах, для детских и взрослых пациентов в 2023 и 2022 гг. Из выборки данных по пленочным рентгенографиям органов грудной клетки для взрослых пациентов исключено одно значение в 3,9 мЗв (Республика Саха)
[Fig. 6. Ranges of the average effective dose for chest radiography performed on analogue and digital X-ray machines for pediatric and adult patients in 2023 and 2022. One value of 3.9 mSv (Republic of Sakha) was excluded from the dataset for analogue chest radiography in adult patients]

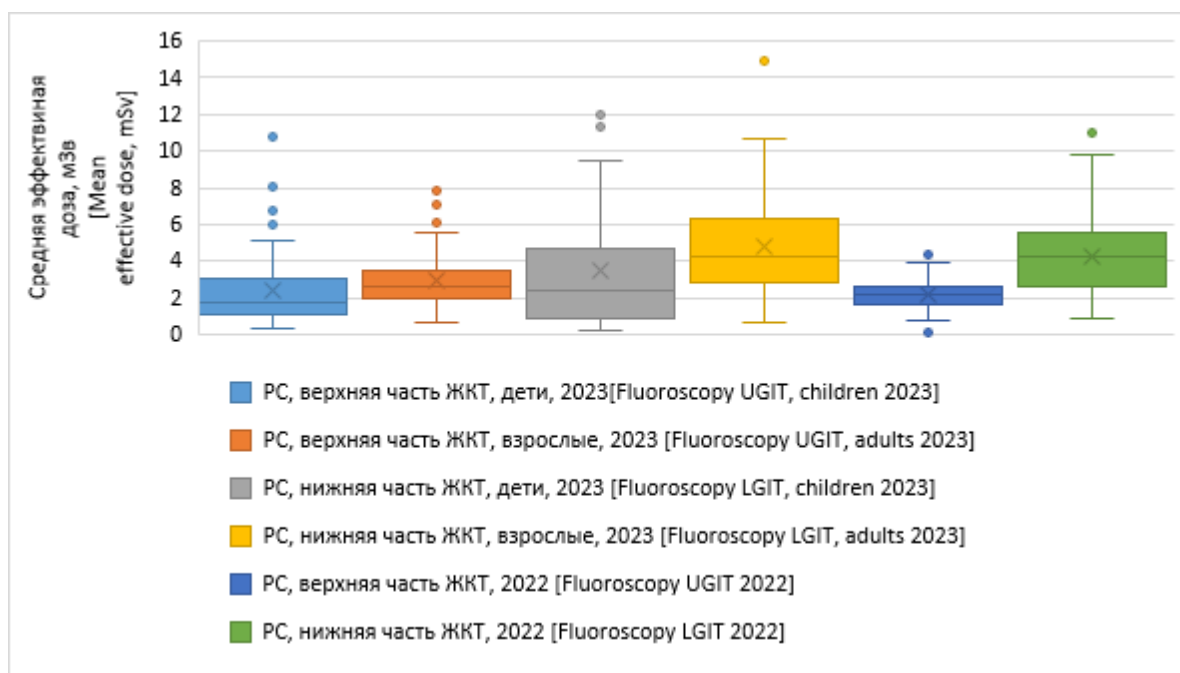


Рис. 7. Диапазоны СЭД для рентгенографии верхнего и нижнего отделов желудочно-кишечного тракта для детских и взрослых пациентов в 2023 и 2022 гг.

[Fig. 7. Ranges of the average effective dose for fluoroscopy of the upper and lower gastrointestinal tract for pediatric and adult patients in 2023 and 2022]

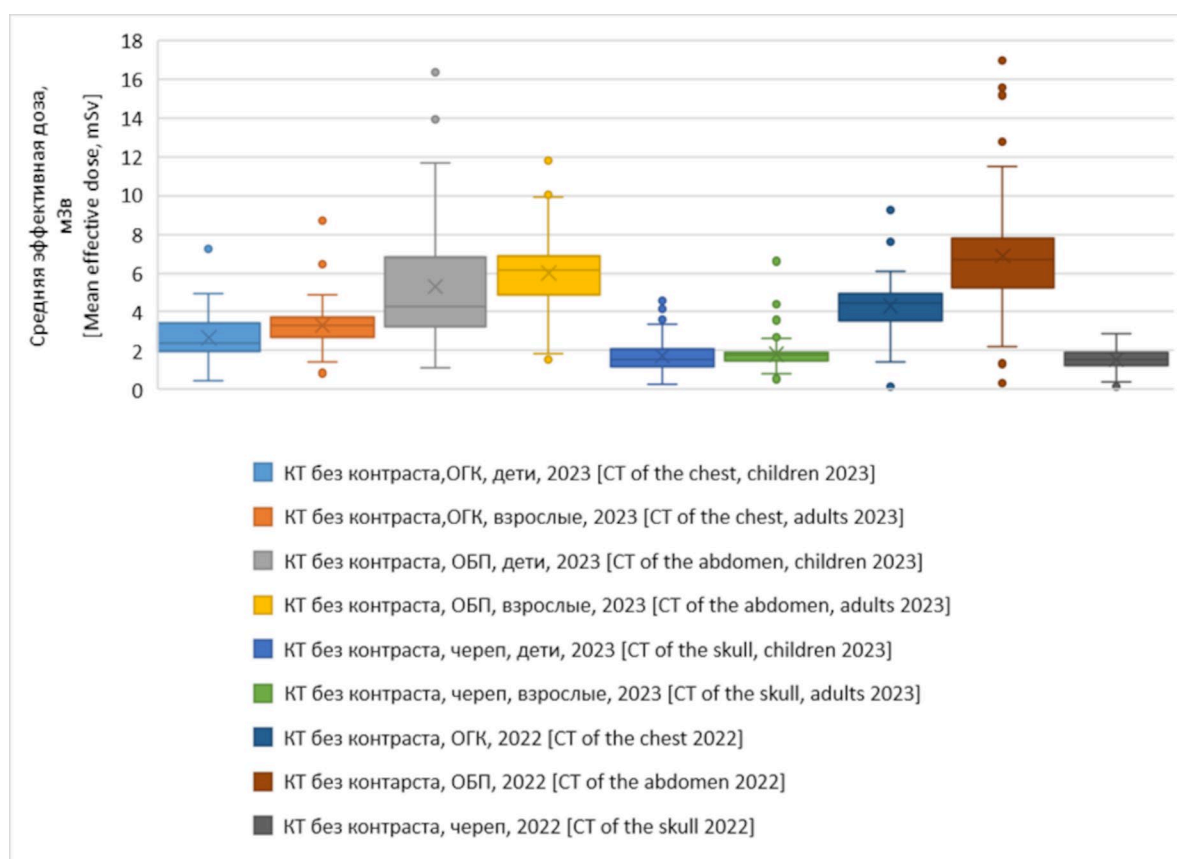


Рис. 8. Диапазоны СЭД для компьютерной томографии органов грудной клетки (ОГК), органов брюшной полости (ОБП) и черепа для детских и взрослых пациентов в 2023 и 2022 гг. За 2022 г. представлены объединенные данные; за 2023 г. – только данные по КТ без контраста

[Fig. 8. Ranges of the average effective dose for computed tomography of the chest, abdominal organs, and skull without contrast for pediatric and adult patients in 2023 and 2022. For 2022, combined data is provided; for 2023, only non-contrast CT data is presented]

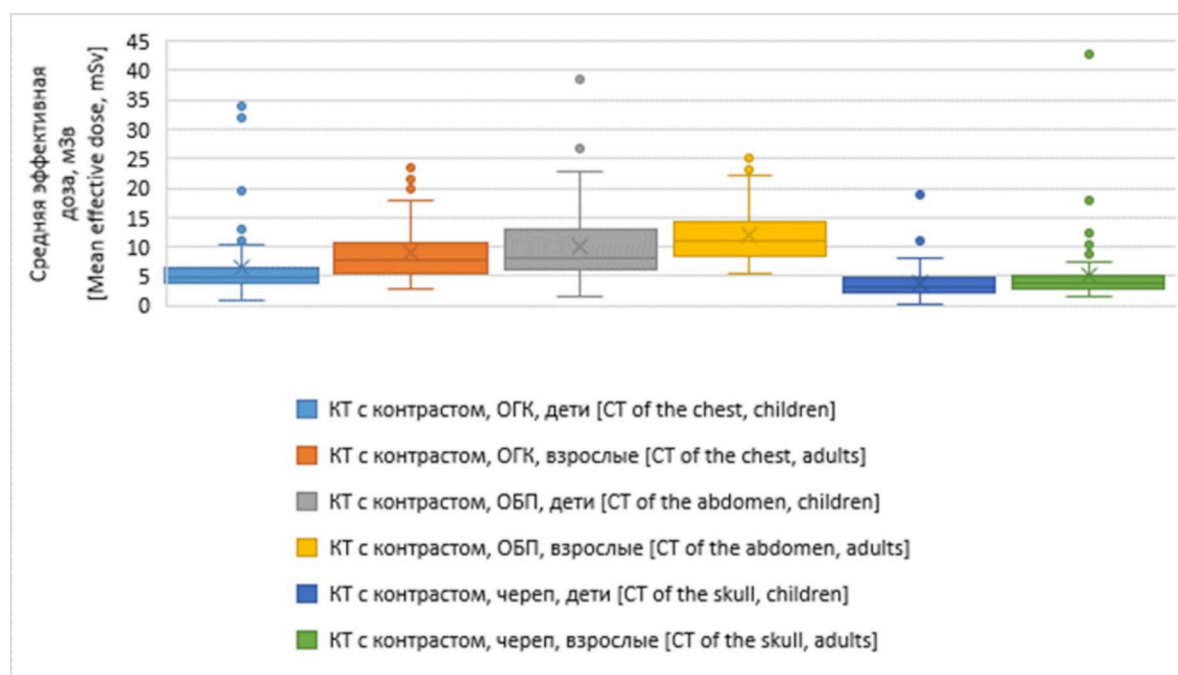


Рис. 9. Диапазоны СЭД для компьютерной томографии ОГК, ОБП и черепа с контрастом для детских и взрослых пациентов в 2023 г. В 2022 г. данные по компьютерным томографиям с контрастом отдельно не собирались

[Fig. 9. Ranges of the average effective dose for computed tomography of the chest, abdominal organs, and skull with contrast for pediatric and adult patients in 2023. Data on contrast-enhanced CT scans was not collected separately in 2022]

Таблица 3

Сравнение СЭД для наиболее распространенных рентгеновских процедур между 2022 и 2023 гг.

[Table 3]

Comparison of the average effective dose for the most common X-ray procedures between 2022 and 2023]

Рентгеновская процедура*** [X-ray Procedure]	СЭД в 2022 г., мЗв* [MED in 2022, mSv]	СЭД в 2023 г., мЗв** [MED in 2023, mSv]	Прирост 2023 г. к 2022г., % [Increase from 2022 to 2023, %]	p для теста Манна-Уитни [p-value for Mann- Whitney test]
Рентгенография органов грудной клетки, плёночная [Radiography of the chest, analogue X-ray unite]	0,10	0,25	140	< 0,001
Рентгенография органов грудной клетки, цифровая [Radiography of the chest, digital X-ray unite]	0,04	0,08	136	< 0,001
Рентгеноскопия верхней части желудочно-кишечного тракта [Fluoroscopy of the upper gastrointestinal tract]	2,23	2,92	31	0,004
Рентгеноскопия нижней части желудочно-кишечного тракта [Fluoroscopy of the lower gastrointestinal tract]	4,26	4,80	13	< 0,001
КТ органов грудной клетки [CT of the chest]	4,30	3,30	-23	0,25
КТ органов брюшной полости [CT of the abdomen]	6,91	6,01	-13	0,039
КТ черепа, челюстно-лицевой области [CT of the skull and maxillofacial region]	1,57	1,79	14	0,02

* данные представлены для объединенной выборки взрослых и детских пациентов; ** данные представлены для взрослых пациентов; *** по КТ данные за 2022 г. представлены для объединенной выборки нативных исследований и исследований с контрастом; в 2023 г. – только для нативных исследований. [* data are presented for a combined cohort of adult and pediatric patients; ** data are presented for adult patients; *** for CT, data for 2022 are presented for the combined dataset of non-contrast and contrast-enhanced studies; for 2023, only non-contrast studies are included.]

Как следует из таблицы 3, максимальные различия наблюдаются для СЭД при рентгенографии органов грудной клетки: в 2023 г. они выросли практически в 2,5 раза. Снижение СЭД для компьютерной томографии объясняется отдельным учетом исследований, выполняющихся с использованием контрастных препаратов и, как следствие, исключением таких высокодозовых исследований из общей выборки. Рост СЭД для рентгеноскопических исследований и компьютерной томографии черепа объясняется более четкими критериями отнесения исследований к данным категориям. В частности, стоматологические процедуры, проводящиеся на конусно-лучевых компьютерных томографах, вынесены из категории «черепа» в категорию «зубы»;

- следует обратить внимание на наличие регионов Российской Федерации с аномально низкими СЭД (рисунки 6–9). К аномально низким СЭД в данном случае можно отнести значения, при которых невозможно провести качественное рентгенорадиологическое исследование в принципе;

- высокие значения СЭД для рентгенографических исследований могут быть объяснены большим количеством выбросов (регионов Российской Федерации с аномально высокими СЭД). Наиболее часто аномально высокие дозы были связаны с рентгенографическими исследованиями и нативными КТ-исследованиями органов грудной клетки, брюшной области, таза, различных отделов позвоночника. Лидерами по количеству аномально высоких СЭД являются Ненецкий АО, Республика Тыва, Республика Саха, Хабаровский край, Карачаево-Черкесская Республика. Тем не менее, для подтверждения этой гипотезы необходимо провести детальный анализ эффективных доз на уровне медицинской организации в каждом из регионов с аномально высокими дозами.

Для проведения такого анализа необходимо разработать и апробировать методику верификации данных, представленных в форме №3-ДОЗ. Успешная верификация данных позволит выявить и дифференцировать причины аномально высоких и/или низких СЭД, а также идентифицировать медицинские организации с такими СЭД. В дальнейшем это позволит провести детальные исследования уровней облучения пациентов в данных организациях и повысить достоверность данных, представленных в форме №3-ДОЗ.

Заключение

Благодаря внедрению в практику новой формы №3-ДОЗ за 2023 год были получены обновленные данные о состоянии лучевой диагностики и уровней медицинского облучения пациентов в Российской Федерации. Впервые в отечественной практике были получены данные об уровнях облучения детских пациентов на уровне страны, а также определены средние эффективные дозы при проведении высокодозовых исследований (интервенционных исследований, компьютерных томографий с контрастом, процедур радионуклидной диагностики).

Коллективная доза от медицинского облучения у взрослого населения увеличилась на 34 % по сравнению с 2022 г. Максимальный рост коллективных доз наблюдался для рентгенографических (81 %), радионуклидных (49 %) и интервенционных (57 %) исследований. Впервые за последние пять лет рост коллективных доз для рентгенорадиологических процедур не сопровождался идентичным ростом числа исследований, что свидетельствует о росте средних и индивидуальных эффективных доз пациентов. Средняя эффективная доза за счет медицинского облучения на одного жителя Российской Федерации в 2023 г. увеличилась более чем в полтора раза: 1,12 мЗв по сравнению с 0,86 мЗв в 2022 г.

- High effective dose values for radiographic procedures may be attributed to a large number of outliers (regions with abnormally high effective doses). The most frequently associated procedures with such high doses were radiographic procedures and native CT scans of the chest, abdomen, pelvis, and spine. The leading regions in terms of abnormally high effective doses are Nenets Autonomous Okrug, Tuva Republic, Sakha Republic, Khabarovsk Krai, and Karachay-Cherkess Republic. To confirm these hypotheses, a detailed analysis of effective doses at the medical organization level in each region with abnormally high doses is required.

To conduct such an analysis, it is necessary to develop and test a data verification methodology for Form No. 3-DOZ. Successful data verification will enable the identification and differentiation of causes of abnormally high and/or low average effective doses, as well as the identification of medical organizations with such doses. This will subsequently facilitate detailed studies of patient radiation exposure levels in these organizations and improve the reliability of the data reported in Form No. 3-DOZ.

Conclusion

The implementation of the new Form No. 3-DOZ in 2023 provided updated data on the status of radiation diagnostics and medical exposure levels among patients in the Russian Federation. For the first time in national practice, data on radiation exposure levels in pediatric patients at the national level were obtained, along with the determination of average effective doses for high-dose procedures, including interventional radiology, contrast-enhanced computed tomography, and diagnostic nuclear medicine examinations.

The collective dose from medical exposure in the adult population increased by 34 % compared to 2022. The most significant rises in collective doses were observed for radiographic (81 %), nuclear medicine (49 %), and interventional (57 %) procedures. Notably, for the first time in five years, the increase in collective doses for X-ray and X-ray procedures was not accompanied by a proportional rise in the number of examinations, indicating a growth in both average and individual effective patient doses. The average effective dose per capita from medical exposure in the Russian Federation in 2023 has increased by a factor of 1.5, reaching 1.12 mSv compared to 0.86 mSv in 2022.

The increase in collective doses across various types of X-ray diagnostics is driven by the growth in average effective doses for different X-ray procedures across Russian regions. The most significant differences in average effective doses were observed for radiographic procedures, with increases of up to a factor of 2.5 compared to 2022. These changes in average effective doses may be attributed to both errors in dose calculation and Form No. 3-DOZ completion, as well as objective factors such as modifications in equipment and/or X-ray procedure protocols. At the same time, some regions of the Russian Federation reported anomalously low average effective doses.

To identify the causes of abnormally high or low effective doses in radiation diagnostics, it is imperative to develop and validate a methodology for verifying data submitted via Form No. 3-DOZ. This methodology will be detailed in the authors' subsequent publications.

Limitations of the Study

When analyzing data from Form No. 3-DOZ for 2022, mean effective doses were calculated for a combined sample of pediatric and adult patients due to the absence of separate recording of patients by age category.

Рост коллективных доз для различных видов лучевой диагностики обусловлен ростом средних эффективных доз для различных рентгенорадиологических процедур в регионах Российской Федерации. Максимальные различия в средних эффективных дозах наблюдаются для рентгенографических процедур (рост вплоть до 2,5 раз по сравнению с 2022 г.). Данные изменения средних эффективных доз могут быть обусловлены как ошибками в расчетах эффективных доз и заполнения формы №3-ДОЗ, так и объективными изменениями в аппаратном парке и/или протоколах проведения рентгеновских процедур. При этом, ряд регионов Российской Федерации, напротив, представил аномально низкие средние эффективные дозы.

Для идентификации причин аномально высоких и/или низких эффективных доз при проведении процедур лучевой диагностики необходима разработка и апробация методики верификации данных, представляемых в форме №3-ДОЗ. Данная методика будет представлена в следующих работах авторов.

Ограничения исследования

При анализе данных формы №3-ДОЗ за 2022 г. средние эффективные дозы определяли для объединенной выборки детских и взрослых пациентов в связи с отсутствием раздельного учета пациентов различных возрастных категорий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

Косарлукова Е.А. – редактировала промежуточный вариант рукописи.

Библин А.М. – редактировал промежуточный вариант рукописи.

Ахматдинов Р.Р. – редактировал промежуточный вариант рукописи.

Братилова А.А. – редактировала промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2022 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023. 134 с.
2. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной защите от 2007 г.: пер. с англ. / под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандала. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности GSR Part 3. МАГАТЭ, Вена, 2015. 518 с.
4. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA, Vienna, 2018. 340 p.
5. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2.

Authors' personal contribution

Aleksandr V. Vodovатов 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.

Ruslan R. Akhmatdinov prepared draft of the manuscript.

Anzhelika A. Bratilova prepared draft of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

References

1. Results of Radiation and Hygiene Certification in the Subjects of the Russian Federation for 2022 (Radiation and Hygiene Passport of the Russian Federation). Moscow: Rospotrebnadzor; 2023. 134 p. (In Russian).
2. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Ed. by MF Kiselev, NK Shandala. Moscow: «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian).
3. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2015. 518 p. (In Russian).
4. Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA, Vienna; 2018. 340 p.
5. Onischenko GG, Popova AY, Romanovich IK, Vodovатов AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 6-24. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
6. Vodovатов A, Chipiga L, Druzhinina P, Shatsky I, Petryakova A, Sarycheva S, et al. Update of the federal governmental statistical surveillance form No 3-DOZ: "Data on patient doses from medical X-ray examinations"— Part 2 (FORM completion Recommendations). *Digital Diagnostics*. 2023;4(3): 322-339. (In Russian). DOI: DOI: 10.17816/DD530656.
7. Vodovатов A, Romanovich I, Alekhovich A, Biblin A, Akhmatdinov R, Druzhinina P, et al. Ensuring Radiation Safety of Patients in the Russian Federation During Diagnostic Medical Radiation: Current State, Problems, and Solutions. *Medical Physics*. 2024;(4): 33-49. (In Russian). DOI: 10.52775/1810-200X-2024-104-4-33-49.

Received: January 31, 2025

- радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
6. Водоватов А.В., Чипига Л.А., Дружинина П.С. и др. Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований»: часть 2 (рекомендации по заполнению формы) // Digital Diagnostics. 2023. Т. 4, № 3. С. 322-339. DOI: 10.17816/DD530656. – EDN XLHQWW.
7. Водоватов А.В., Романович И.К., Алехнович А.В. Обеспечение радиационной безопасности пациентов в Российской Федерации при диагностическом медицинском облучении: текущее состояние, проблемы и решения // Медицинская физика. 2024. № 4. С. 33-49. DOI: 10.52775/1810-200X-2024-104-4-33-49.

Поступила: 31.01.2025

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

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

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

ORCID: 0009-0000-2300-6788

Братилова Анжелика Анатольевна – старший научный сотрудник, заведующая лабораторией внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-6489-3974

Для цитирования: Водоватов А.В., Косарлукова Е.А., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р., Братилова А.А. Анализ уровней медицинского облучения населения Российской Федерации в 2023 г. с использованием актуализированной формы №3-ДОЗ // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 85–99. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-85-99

For correspondence: 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 (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)

ORCID 0000-0002-5191-7535

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 Well-Being, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0007-6476-9571

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

ORCID 0000-0002-3139-2479

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

ORCID: 0009-0000-2300-6788

Anzhelika A. Bratilova – Head of the Laboratory of Internal Exposure at the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-6489-3974

For citation: Vodovatov A.V., Kosarlukova E.A., Biblin A.M., Akhmatdinov R.R., Bratilova A.A. Analysis of medical exposure levels of the Russian Federation population in 2023 using the updated form No. 3-DOZ. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 85–99. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-85-99

Радиационно-гигиеническая характеристика и санитарное состояние территории проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2» в Республике Коми

К.В. Варфоломеева¹, К.А. Седнев¹, А.М. Библин¹, С.А. Иванов¹, С.А. Зеленцова¹,
В.С. Репин¹, А.Г. Георгиева²

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 Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия
человека по Республике Коми, Сыктывкар, Россия

Введение: Мониторинг уровня радиоактивного загрязнения, особенно содержания трития в водных источниках, как индикатора потенциального выхода техногенных радионуклидов из зон хранения радиоактивных отходов, образовавшихся в результате проведения мирных ядерных взрывов, имеет решающее значение для обеспечения радиационной безопасности и позволяет оперативно реагировать на возникающие риски, минимизируя негативные последствия для окружающей среды и здоровья населения. Целью данного исследования являлась оценка радиационно-гигиенического состояния мест проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2» Республики Коми. **Материалы и методы:** В июле-августе 2021 года в Республике Коми проводились полевые исследования на территориях, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2». Исследования включали измерение мощности амбиентного эквивалента дозы, содержания техногенных радионуклидов в почве и удельной активности трития в водоемах и источниках питьевой воды в ближайших населенных пунктах. Измерение мощности амбиентного эквивалента дозы проводилось с помощью спектрометра МКГ-АТ1321, идентификация гамма-излучающих радионуклидов на местности осуществлялась при помощи сцинтилляционного портативного гамма-спектрометра МКСП-01. Удельная активность трития в водных пробах определялась с использованием жидкостного сцинтилляционного спектрометра «Quantulus-1220». **Результаты исследования и обсуждение:** Измеренная мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на всех обследованных территориях соответствовала естественному радиационному фону: на территории мирного ядерного взрыва «Глобус-3» значения варьировались от 0,01 до 0,04 мкЗв/ч, а на территории «Кварц-2» — от 0,01 до 0,06 мкЗв/ч. На исследованных территориях не выявлено участков почвы, загрязненных техногенными радионуклидами. Значения удельной активности трития в пробах питьевой воды не превышали 5,34 Бк/кг, что существенно ниже установленного гигиенического норматива (7 600 Бк/кг) и соответствуют фоновым значениям. Дополнительное техногенное облучение, обусловленное поступлением трития с питьевой водой из систем централизованного водоснабжения, не превышает 0,05 мкЗв/год. **Заключение:** Радиационная обстановка в районах проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2» соответствует требованиям СанПиН 2.6.1.2819-10 и не создает рисков для здоровья местного населения. Однако отмечено неудовлетворительное санитарное состояние охранных зон этих объектов. Представленные результаты имеют практическое значение для будущих исследований и могут служить основанием для приведения охранных зон в соответствие с требованием пункта 3.5 раздела 3 СанПиН 2.6.1.2819-10.

Ключевые слова: мирные ядерные взрывы, тритий, Республика Коми, «Глобус-3», «Кварц-2», радионуклиды, окружающая среда, радиационная безопасность, радиационная обстановка.

Введение

Согласно государственной программе №7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства», с 1965 по 1988 гг. в 20 субъектах Российской Федерации было проведено 82 мирных ядерных взрыва (МЯВ). Оценка их воздействия на окружающую среду и здоровье населения периодически рассматривалась в научных публикациях [1–19]. В рамках Федеральных целевых программ по ядерной и радиацион-

ной безопасности были проведены исследования радиационной обстановки на территориях МЯВ и на прилегающих к ним территориях. Результаты исследований отражены в ряде научных статей [3, 4, 6–8, 11, 13–17].

Потенциальная опасность МЯВ заключается в том, что их центральные зоны, загрязненные радионуклидами, остаются фактически хранилищем радиоактивных отходов на протяжении 200–300 лет [1–4]. Бурение исследовательских скважин, повреждение забетониро-

Варфоломеева Ксения Владимировна

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

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

ванных пространств и несанкционированная деятельность в охранных зонах увеличивают риск выхода техногенных радионуклидов в водоносные горизонты и на поверхность, что повышает радиационную опасность для местного населения [5, 6].

Контроль уровня радиоактивного загрязнения окружающей среды в районах проведения МЯВ является обязательным [4, 7–15]. Периодическая оценка содержания трития в объектах окружающей среды, а также контроль его содержания в источниках питьевого водоснабжения в ближайших к месту проведения взрыва населенных пунктах, способствует выявлению и отслеживанию изменений в радиационной обстановке [16, 17]. Это позволяет своевременно реализовывать мероприятия по обеспечению радиационной безопасности местного населения, включая информирование о потенциальных рисках и мерах предосторожности.

Сотрудниками ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева при участии Управления Роспотребнадзора по Республике Коми в июле-августе 2021 года было выполнено радиационно-гигиеническое обследование территорий, прилегающих к местам проведения четырех МЯВ («Глобус-4», «Горизонт-1», «Глобус-3», «Кварц-2»). Результаты исследования радиационной обстановки в местах проведения МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1» были опубликованы ранее [14].

Цель исследования – выполнить радиационно-гигиеническую оценку состояния мест проведения МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2» Республики Коми.

Материалы и методы

На территории Республики Коми в период с 1971 по 1984 г. было осуществлено четыре МЯВ. Их назначением являлось сейсмозондирование земной коры [5]. Карта-схема расположения МЯВ на территории Республики Коми приведена на рисунке 1.

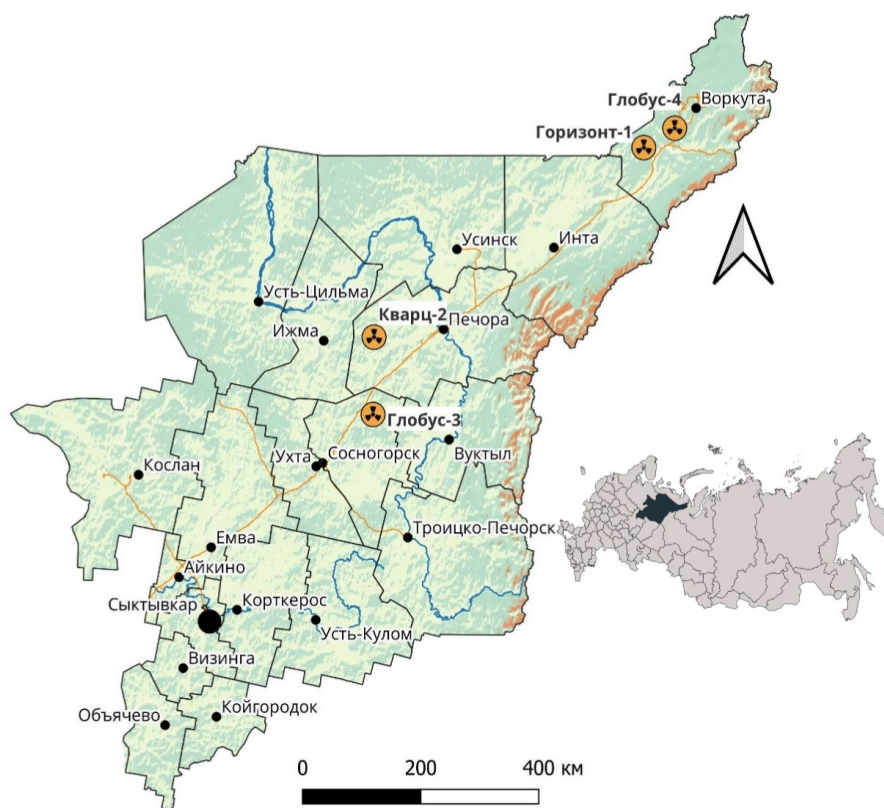


Рис. 1. Карта-схема расположения мест проведения МЯВ на территории Республики Коми Российской Федерации [14]

[Fig. 1. Map-scheme of locations of peaceful nuclear explosion (PNE) sites on the territory of the Komi Republic the Russian Federation [14]]

Мирный ядерный взрыв «Глобус-3» был проведен 10 июля 1971 года в 20 км восточнее станции Лемью. Мощность заряда составляла 2,3 килотонны тротилового эквивалента, глубина закладки заряда 465 м [5]. Территория проведения МЯВ «Глобус-3» расположена на легкодоступной территории Сосногорского района Республики Коми в непосредственной близости от регулярно используемой дороги.

МЯВ «Кварц-2» был проведен 11 августа 1984 года в 80 км к западу от города Печоры. Мощность заряда

составляла 8,5 килотонн тротилового эквивалента, глубина закладки заряда 760 м [5]. Объект «Кварц-2» расположен на труднодоступной территории Каджеромского лесничества Печорского района Республики Коми. Расстояние до райцентра Ижма от скважины – 40 км, до деревни Ластва – 45 км, до пос. Трубоседейль – 50 км, до пос. Каджером – 65 км. Карта-схема региона расположения МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2» приведена на рисунке 2.

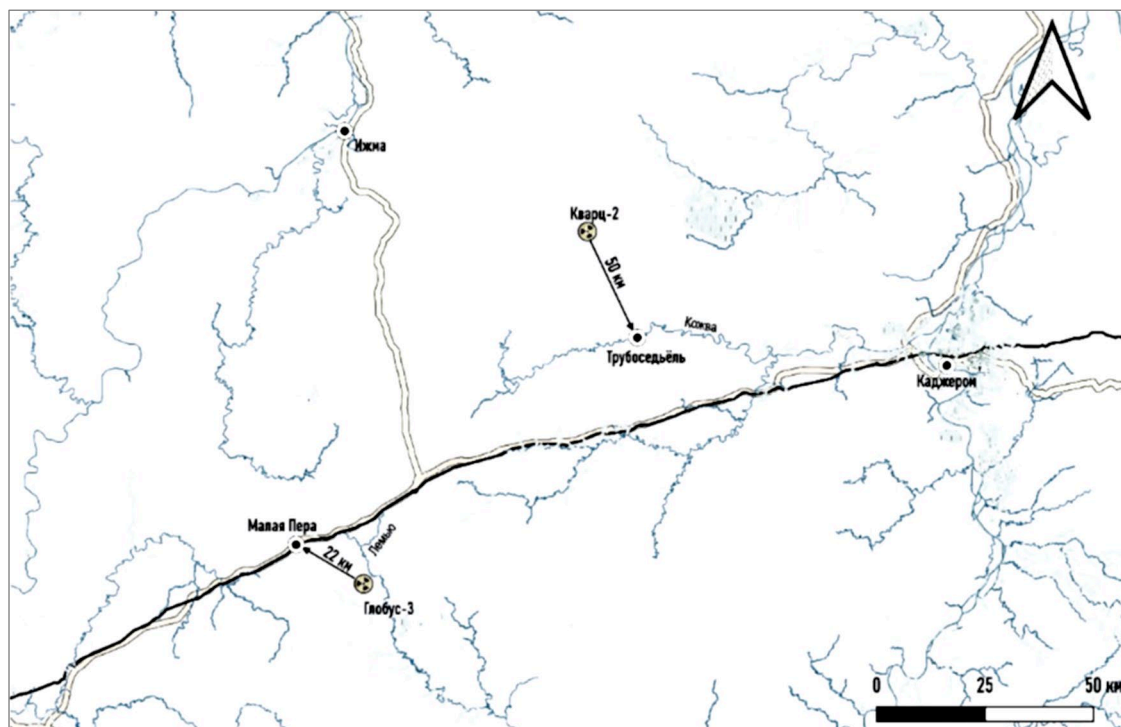


Рис. 2. Карта-схема региона расположения мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2»
[Fig. 2. Map-scheme of the “Globus-3” and “Quartz -2” PNE location]

Обследование территорий проведения МЯВ осуществлялось по стандартной методике [18, 19], которая предусматривала: определение точных географических координат характерных элементов местности, точек измерений и отбора проб с помощью спутниковой навигации; измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД); идентификацию гамма-излучающих радионуклидов на месте с помощью полевой спектрометрии; отбор проб верхнего слоя почвы (до 20 см) и воды для анализа на содержание трития; проведение фотосъемки.

Измерение МАЭД выполнялось на высоте 1 м от поверхности почвы с помощью спектрометра МКГ-АТ1321 (производство фирмы АТОМТЕХ, Беларусь). На территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Глобус-3», измерения были проведены в 192 точках, а на «Кварц-2» – в 18 точках.

Идентификация гамма-излучающих радионуклидов на местности проводилась с помощью переносного спектрометра МКСП-01 (производство фирмы «РАДЭК», Россия) со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) Ø80×80 мм (диапазон регистрируемых энергий от 100 кэВ до 3 МэВ; энергетическое разрешение по линии гамма-излучения радионуклида ^{137}Cs с энергией 661,6 кэВ не превышает 9,5 %) с экспозицией не менее 30 минут [20]. Координаты точек проведения гамма-спектрометрических измерений МЯВ «Глобус-3» (пять точек) и «Кварц-2» (пять точек) представлены в таблице 1. Лабораторные измерения удельной активности радионуклидов в почве проводились в геометрии «Маринелли», объемом 1 дм³ на гамма-спектрометрической

установке МКСП-01 (производство фирмы «РАДЭК», Россия) со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) Ø80×80 мм при времени экспозиции 2-3 часа. Обработка гамма-спектрометров проводилась методом, представленным в статье [21].

Определение удельной активности трития в воде счетных образцов выполнены в соответствии с требованиями МУК 4.3.044-20122 по методике выполнения измерений активности альфа-, бета-излучающих радионуклидов в жидких и твердых пробах с использованием радиометра альфа-, бета-излучения спектрометрического «Quantulus-1220» фирмы «PerkinElmer», США (свидетельство об аттестации методики № 45014.15225/RA.RU.311243 от 11 декабря 2015 года). Минимально детектируемая активность при продолжительности измерений 720 минут обеспечивает измерение удельной активности радионуклидов в пробах с нижним пределом около 1 Бк/кг.

На территориях, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов, было отобрано 5 проб воды на объекте «Глобус-3» и 2 пробы воды на объекте «Кварц-2» для определения содержания трития. Для дополнительного анализа на содержание трития были отобраны пробы из источников питьевого водоснабжения, используемых в населённых пунктах, находящихся в непосредственной близости от мест проведения мирных ядерных взрывов. Количество отобранных проб составило: 4 пробы в п. Ираёль, 2 пробы в п. Малая Пера и 3 пробы в п. Трубочедель.

Геоинформационная система QGIS 3.28 использовалась для визуализации расположения точек измерений и отбора проб, а также особенностей ландшафта исследуемых территорий.

Доза внутреннего облучения представительного индивидуума за счет поступления ^3H с питьевой водой в населенном пункте ($E_{\text{вода_нп}}$) рассчитывалась по формуле:

$$E_{\text{вода_нп}} = m_{\text{вода}} \cdot A_i^{H^3} \cdot \varepsilon_{H^3}$$

где $E_{\text{вода_нп}}$ – доза внутреннего облучения представительного индивидуума за счет поступления трития (^3H) с питьевой водой; $m_{\text{вода}}$ – годовое потребление воды, принятое в соответствии с НРБ-99/2009¹ равным 730 кг/год; $A_i^{H^3}$ – максимальная удельная активность ^3H в воде из i -го источника питьевого водоснабжения в населенном пункте; ε_{H^3} – дозовый коэффициент для ^3H при его поступлении с питьевой водой в организм взрослого человека, установленный в НРБ-99/2009 равным $1,8 \cdot 10^{-5}$ мкЗв/Бк.

Результаты и обсуждение

Краткая характеристика санитарного состояния территорий МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2»

«Глобус-3»

В месте проведения МЯВ «Глобус-3» имеется технологическая скважина, представляющая собой металлическую трубу, выходящую из металлического постамент. В 2013 году при паспортизации объекта МЯВ был обнаружен информационный знак о проведении МЯВ. Знак представлял собой круглую металлическую табличку, закрепленную на трубе, установленной на бетонной тумбе, и располагался рядом с технологической скважиной. По состоянию на август 2021 года знак, информирующий о проведении МЯВ на данной территории и о запрете на проведение буровых работ, отсутствует (рис. 3а).



Рис. 3. Фотографии технологических скважин МЯВ «Глобус-3» (а) и «Кварц-2» (б), 2021
[Fig. 3. Photographs of the technological boreholes of the PNE “Globus-3” (a) and “Quartz-2” (b), 2021]

На предполагаемой территории его расположения обнаружены многочисленные следы от шин крупногабаритного автотранспорта и перерытая почва. В почве имеются фрагменты бетона, возможно, от основания разрушенной тумбы с реперным знаком. На рисунке 4 представлено санитарное состояние охранной зоны на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-3».

«Кварц-2»

Информационные знаки МЯВ «Кварц-2» расположены на бетонной тумбе, обитой деревянными досками. Тумба находится

в разрушающемся состоянии. Текст на знаках трудночитаемый (рис. 3б). Территория, прилегающая к месту проведения МЯВ «Кварц-2», характеризуется наличием большого количества металлоконструкций, труб, емкостей и других объектов.

Анализ основных показателей, характеризующих радиационно-гигиеническое состояние территорий МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2»

Результаты измерений МАЭД, зафиксированные в районе проведения МЯВ «Глобус-3», находились в диапазоне от 0,01 до 0,04 мкЗв/ч, среднее значение 0,02 мкЗв/ч, стандартное отклонение 0,006 мкЗв/ч.

¹СанПин 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. № 47. Введены в действие с 1 сентября 2009 г. (Приложение 2а) [SanPIN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009) Approved by Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 47 of 7 July 2009. Introduced as of 1 September 2009 (Annex 2a) (In Russ)]



Рис. 4. Санитарное состояние охранной зоны МЯВ «Глобус-3»
[Fig. 4. Sanitary condition of the protected zone of the PNE "Globus-3"]

Результаты измерений МАЭД в районе проведения МЯВ «Кварц-2» варьировались от 0,01 до 0,06 мкЗв/ч, со средним значением 0,04 мкЗв/ч и стандартным отклонением 0,01 мкЗв/ч, что не превышает естественный гамма-фон на территории Республики Коми. По данным ежегодного Государственного доклада «О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2021 году», естественный гамма-фон находится в пределах 0,07–0,16 мкЗв/ч [22].

Анализ полевых гамма-спектров и проб почвы не обнаружил участков локального загрязнения техногенными радионуклидами на территориях, где проводились МЯВ «Кварц-2» и «Глобус-3». Расшифровка полевых спектров представлена в таблице 1.

Типичные полевые спектры, полученные в районах проведения МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2», показаны на рисунках 5 и 6 соответственно.

Результаты измерений интенсивности пиков полного поглощения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi и ^{208}Tl в спектрах полевой гамма-спектрометрии на территориях МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2»

Таблица 1

Results of measurements of the intensity of peaks of full absorption of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi and ^{208}Tl in the spectra of field gamma spectrometry on the territories of the PNE "Globus-3" and "Quartz-2"

[Table 1

Код спектра [Code spectrum]	Координаты, градусы [Coordinates, degrees]	Интенсивность счета под пиком, имп/с (Энергия распада, мэВ) [The peak count rate, cps (Deca y energy, meV)]			
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²¹⁴ Bi	²⁰⁸ Tl
		(0,661 мэВ)	(1,461 мэВ)	(0,609 мэВ)	(2,614 мэВ)
МЯВ «Глобус-3» [PNE “Globus-3”]					
Спектр-1 [Spectrum-1]	N 64.16576 E 55.26116	0,41 (0,08)	1,50 (0,14)	1,87 (0,08)	0,18 (0,04)
Спектр-2 [Spectrum-2]	N 64. 16579 E 55.26082	—*	2,26 (0,13)	2,28 (0,09)	0,30 (0,05)
Спектр-3 [Spectrum-3]	N 64. 16582 E 55.26152	—*	2,20 (0,13)	3,22 (0,10)	0,28 (0,05)

Код спектра [Code spectrum]	Координаты, градусы [Coordinates, degrees]	Интенсивность счета под пиком, имп/с (Энергия распада, МэВ) [The peak count rate, cps (Decay energy, MeV)]			
		¹³⁷ Cs (0,661 МэВ)	⁴⁰ K (1,461 МэВ)	²¹⁴ Bi (0,609 МэВ)	²⁰⁸ Tl (2,614 МэВ)
Спектр-4 [Spectrum-4]	N 64.16618 E 55.26087	—*	0,74 (0,12)	2,17 (0,08)	0,11 (0,03)
Спектр-5 [Spectrum-5]	N 64.16709 E 55.26191	0,45 (0,12)	0,63 (0,13)	2,09 (0,08)	0,05 (0,56)
МЯВ «Кварц-2» [PNE "Quartz-2"]					
Спектр-6 [Spectrum-6]	N 65.04556 E 55.28880	0,32 (0,05)	1,11 (0,10)	2,35 (0,09)	0,16 (0,04)
Спектр-7 [Spectrum-7]	N 65.04552 E 55.28898	—*	1,04 (0,11)	3,08 (0,09)	0,14 (0,09)
Спектр-8 [Spectrum-8]	N 65.04548 E 55.28851	0,30 (0,07)	0,96 (0,13)	3,07 (0,09)	0,11 (0,04)
Спектр-9 [Spectrum-9]	N 65.04522 E 55.28875	—*	3,54 (0,18)	3,23 (0,10)	0,58 (0,06)
Спектр-10 [Spectrum-10]	N 65.04578 E 55.28775	—*	8,74 (0,27)	3,39 (0,11)	1,46 (0,08)

* Пик не идентифицирован [Peak was not identified]

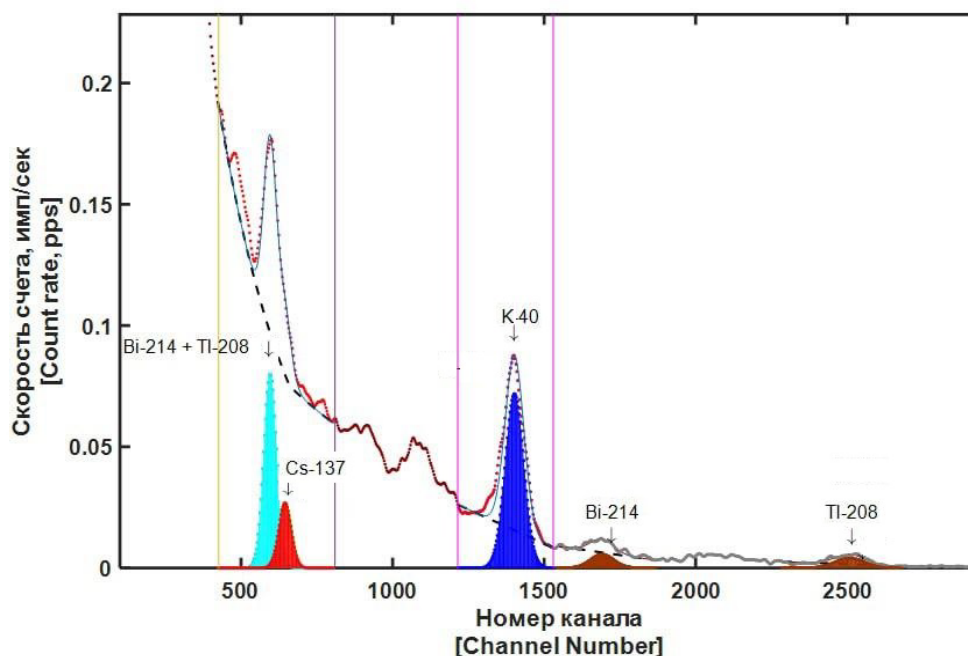


Рис. 5. Спектр-1 в месте размещения боевой скважины на объекте «Глобус-3»
[Fig. 5. Spectrum-1 measured at the location of the nuclear test boreholes at the "Globus-3" PNE site]

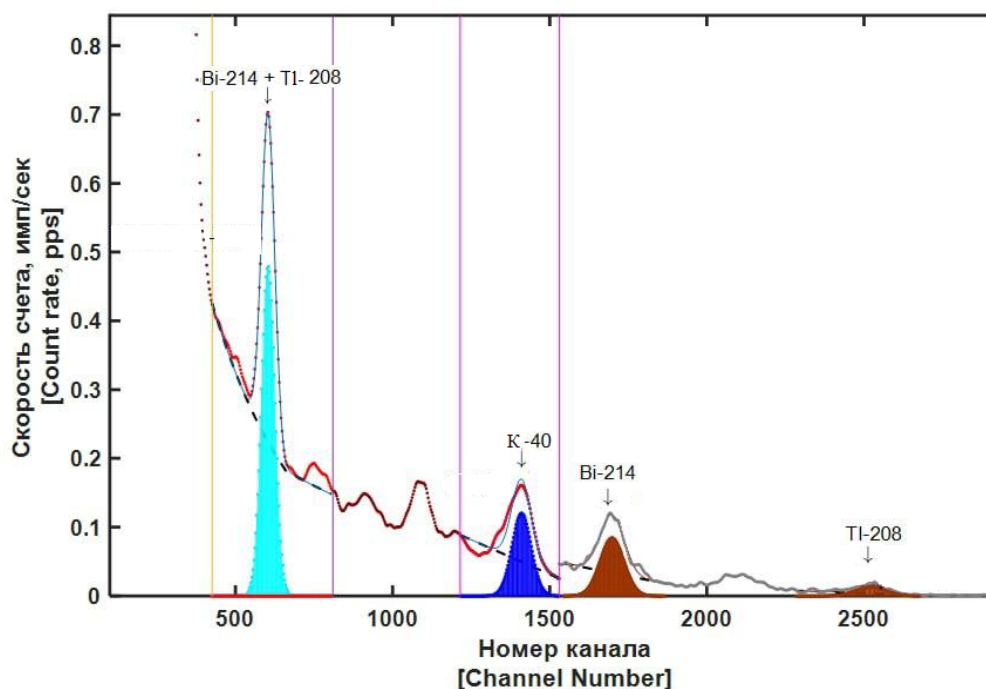


Рис. 6. Спектр-10 в месте размещения лагеря экспедиции на объекте «Кварц-2»
[Fig. 6. Spectrum-10 measured at the location of the expedition camp at the “Quartz-2” PNE site]

В спектре на рисунке 5 (объект «Глобус-3») идентифицирован небольшой пик ^{137}Cs , характерный для уровня глобального загрязнения целинных почв.

На объекте «Кварц-2» пик ^{137}Cs не идентифицирован, что, возможно, обусловлено нарушением верхнего слоя

почвы вследствие перекопки или засыпки.

Результаты лабораторных исследований удельной активности ^{137}Cs в пробах почвы, отобранных на территориях проведения МЯВ, представлены в таблице 2.

Удельная активность ^{137}Cs и ^{40}K в пробах почвы в районах проведения МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2»

Таблица 2

Activity concentration of ^{137}Cs and ^{40}K in soil samples collected in the protected zones of the PNE “Globus-3” and “Quartz-2”]

[Table 2

Код спектра [Code Spectrum]	Время измерения, с [Time of measurement, s]	Удельная активность, Бк/кг [Activity concentration, Bq/kg]	
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
МЯВ «Глобус-3» [PNE “Globus-3”]			
Спектр-1 [Spectrum-1]	3 580	<3,5	244 ± 75
Спектр-2 [Spectrum-2]	7 160	<2,2	206 ± 36
Спектр-3 [Spectrum-3]	21 480	3,0 ± 0,7	243 ± 41
Спектр-4 [Spectrum-4]	7 160	<2,2	199 ± 63
Спектр-5 [Spectrum-5]	7 160	<2,2	437 ± 46
МЯВ «Кварц-2» [PNE “Quartz-2”]			
Спектр-6 [Spectrum-6]	7 160	<2,2	321 ± 69
Спектр-7 [Spectrum-7]	21 480	1,0 ± 0,6	284 ± 38
Спектр-8 [Spectrum-8]	7 160	<2,2	432 ± 49
Спектр-9 [Spectrum-9]	42 960	2,3 ± 0,5	299 ± 41
Спектр-10 [Spectrum-10]	21 480	<1,0	275 ± 36

Измеренные значения удельной активности ^{137}Cs во всех исследованных пробах почвы находятся на уровне и менее фоновых значений.

Результаты лабораторных исследований содержания трития в пробах воды из водных объектов в районах проведения МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2» представлены в таблице 3.

Таблица 3

Удельная активность ^3H в пробах воды водных объектов в районах проведения МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2»

[Table 3]

^3H activity concentration in water samples from water bodies in the areas of The PNE “Globus-3” and “Quartz -2”]

Название МЯВ [PNE Name]	Количество проб, шт. [Number of samples, pcs]	Удельная активность ^3H , Бк/кг [^3H activity concentration, Bq/kg]		
		Минимум [Min]	Максимум [Max]	Среднее значение [Average]
«Глобус-3» [“Globus-3”]	5	1,18 ± 0,73	3,27 ± 0,83	2,19 ± 0,78
«Кварц-2» [“Quartz-2”]	2	2,49 ± 0,84	5,34 ± 1,08	4,18 ± 0,96

Во всех исследованных пробах воды, взятых из водоемов в районах проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2», содержание трития находилось в диапазоне от 1,18 до 5,34 Бк/кг. Результаты измерений проб из источников питьевого водоснабжения в населенных пунктах, расположенных в непосредственной близости от мест проведения МЯВ, также соответствовали региональным значениям [22] и были значительно ниже уровня вмешательства для трития в питьевой воде — 7 600 Бк/кг¹.

Доза внутреннего облучения представительного индивидуума за счет поступления трития с питьевой водой со средним значением удельной активности, равной 4,0 Бк/кг, рассчитанная по формуле 1, составила 0,05 мкЗв/год.

Собственные результаты исследования радиационной обстановки на территориях МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2» согласуются с литературными данными и данными Государственного доклада Республики Коми. Параметры радиационной обстановки в районе проведения обследованных мирных ядерных взрывов соответствуют естественному радиационному фону, характерному для данного региона [22].

Заключение

Результаты исследований показали, что радиационная обстановка на территориях МЯВ «Глобус-3» и «Кварц-2» на момент исследования соответствовала требованиям СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях»². На исследованных территориях не обнаружены участки, загрязненные техногенными радионуклидами. Анализ проб воды, отобранных на территориях проведения МЯВ и в близлежащих населенных пунктах, показал, что концентрация трития не превышает характерных для Российской Федерации значений.

Обнаружено неудовлетворительное санитарное состояние территорий, прилегающих к местам проведения МЯВ. На территории разбросано заржавевшее оборудование, бочки и строительный мусор. На месте проведения МЯВ «Кварц-2» информационные знаки повреждены, надписи едва различимы, бетонное основание над боевой скважиной разрушено. На месте проведения МЯВ «Глобус-3» знак отсутствует.

Результаты, изложенные в данной работе, могут служить основой для сравнительных исследований в рамках будущих программ мониторинга и обосновывают необходимость проведения работ по улучшению санитарного состояния охранной зоны в соответствии с требованием пункта 3.5 раздела 3 СанПиН 2.6.1.2819-10².

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Варфоломеева К.В. осуществила оформление результатов измерений, выполнила поиск литературных данных, подготовила иллюстративный материал к статье, оформила окончательный вариант статьи для публикации в журнале.

Седнев К.А. провел отбор части проб, полевые измерения и фотосъемку на местности, выполнил обработку и систематизацию первичных материалов исследования, анализ данных, подготовил черновик рукописи и иллюстративный материал к статье.

Библин А.М. руководил выполнением полевых исследований, провел отбор части проб, выполнил анализ литературных данных, подготовил иллюстративный материал к статье, редактировал промежуточный вариант текста статьи.

Иванов С.А. осуществил отбор части проб, провел полевую спектрометрию, систематизацию первичных материалов исследования и анализ данных.

² СанПиН 2.6.1.2819-10 Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965 - 1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 29.12.2010 № 183. Введены в действие с 20.05.2011. [SanPIN 2.6.1.2819-10. Ensuring radiation safety of the population living in areas where nuclear explosions for peaceful purposes were conducted (1965–1988). Approved by resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation G.G. Onishchenko of 29.12.2010 № 183. Entered into force on 20.05.2011. (In Russ.)]

Зеленцова С.А. осуществила оформление результатов измерений, анализ литературных данных, оформила окончательный вариант статьи для публикации в журнале.

Репин В.С. осуществлял общее руководство выполнением исследовательской работы, выполнил обработку полевых спектров и спектров измерения трития, предложил форму отображения санитарного состояния территории МЯВ, отредактировал промежуточный вариант статьи.

Георгиева А.Г. организовала проведение полевых исследовательских работ, выполнила редактирование промежуточного варианта статьи.

Благодарности

Авторы выражают признательность специалистам государственного учреждения Республики Коми «Каджеромское лесничество» за помощь в транспортировке участников полевых исследований к местам проведения мирных ядерных взрывов «Кварц-2» и «Глобус-3». Благодарим рецензентов за конструктивные замечания и предложения, которые способствовали улучшению качества статьи.

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 г. «Разработка и научное обоснование радиационно-гигиенических требований к охраняемым 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 здоровьем и повышения качества жизни населения России» по теме: «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно-гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».

Литература

1. Современная радиозоологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации / Кол. авторов под рук. проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2005. 256 с.
2. Особые радиоактивные отходы. Под общей редакцией Линге И.И. М.: ООО «САМполиграфист», 2015 г., 240 с.
3. Шандала Н.К., Киселев С.М., Титов А.В. Научно-практический опыт надзорной деятельности в области обеспечения защиты населения и окружающей среды на объектах ядерного наследия России // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (Спецвыпуск). С. 83–96. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2s-83-96.
4. Рамзаев В.П., Репин В.С. Радиоактивные стекловидные включения в почве, отобранной на месте проведения мирных подземных ядерных взрывов проекта «Тайга» (Пермский край, Россия) // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 148–159. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-148-159.
5. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Колл. авторов под. рук. проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2001. 519 с.
6. Репин В.С., Рамзаев В.П., Библин А.М. и др. Анализ возможностей оценки размеров охранных зон мирных ядерных взрывов на основе количественных закономерностей деформации земных недр // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 134–147. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-134-147.
7. Храмов Е.В. Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» до выполнения реабилитационных работ // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 81–88. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-81-88.
8. Храмов Е.В. Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» после выполнения реабилитационных работ // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 58–68. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-58-68.
9. Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В. и др. Оценка радиационной обстановки в районе проведения мирного ядерного взрыва «Тахта-Кугульта» // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66, № 2. С. 13–22. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-13-22.
10. Титов А.В., Шандала Н.К., Бельских Ю.С. и др. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Метеорит-5» // Радиоактивные отходы. 2021. № 16, С. 94–102. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-94-102.
11. Храмов 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123.
12. Yakovlev E., Puchkov A., Bykov V. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities of the Pechora River estuary: Bottom sediments and water (Arctic Ocean Basin) // Marine Pollution Bulletin. 2021. 172. P. 112765. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112765.
13. Библин А.М., Храмов Е.В., Репин В.С. и др. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Пирит» // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 149–161. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-149-161.
14. Библин А.М., Варфоломеева К.В., Седнев К.А. и др. Современное радиационно-гигиеническое состояние территорий проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-4» и «Горизонт-1» в Республике Коми // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 121–130. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-121-130.
15. Рамзаев В.П., Репин В.С. Удельная активность ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am в просеянной почве и почвенных включениях с места проведения мирных ядерных взрывов «Тайга» // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 79–92. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-79-92.
16. Рамзаев В.П., Библин А.М., Репин В.С. и др. Загрязнение тритием поверхностных и подземных вод в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр» // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 6–26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26.
17. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-67-78.
18. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности // Радиационная гигиена. 2009 Т. 2, №2. С. 27–33.
19. Рамзаев В.П., Медведев А.Ю., Репин В.С. и др. Радиационно-гигиенический мониторинг в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях и расчет доз облучения критических групп населения // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. С. 33–39.

20. Характеристика прибора МКГБ-01. URL: <https://clck.ru/3G4HZV> (Дата обращения: 13.01.2025).
21. Репин В.С., Седнев К.А. Метод обработки спектра при измерении детектором NaI(Tl) малых уровней удельной активности ^{137}Cs в присутствии природных радионуклидов // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 142–148. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-142-148.
22. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2021 году»: гос. доклад / Минприроды Республики Коми; под общ. ред. ГБУ РК «ТФИ РК». Электронная версия. Сыктывкар: Минприроды Республики Коми, 2022. 167 с. URL: <https://clck.ru/3FugUS>. (Дата обращения: 14.01.2025).

Поступила: 27.01.2025

Варфоломеева Ксения Владимировна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: varfolomeeva_K@mail.ru

Седнев Константин Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

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

Зеленцова Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Георгиева Антонина Георгиевна – главный специалист-эксперт территориального отдела Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Коми в г. Усинске, Усинск, Россия

Для цитирования: Варфоломеева К.В., Седнев К.А., Библин А.М., Иванов С.А., Зеленцова С.А., Репин В.С., Георгиева А.Г. Радиационно-гигиеническая характеристика и санитарное состояние территории проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2» в Республике Коми // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, No 1. С. 100–111. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-100–111.

Radiation-hygienic characteristics and sanitary condition of the territories of the Globus-3 and the Quartz-2 peaceful nuclear explosions sites in the Komi Republic

**Kseniya V. Varfolomeeva¹, Konstantin A. Sednev¹, Artem M. Biblin¹, Sergey A. Ivanov¹,
Svetlana A. Zelentsova¹, Viktor S. Repin¹, Antonina G. Georgieva²**

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

² Administration of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Republic of Komi in Ussinsk, Ussinsk, Russia

Introduction: Monitoring the level of radioactive contamination, especially the tritium content in water sources, as an indicator of potential releases of man-made radionuclides from radioactive waste storage areas formed as a result of peaceful nuclear explosions, is crucial for ensuring radiation safety. It allows for a prompt response to emerging risks, minimizing negative consequences for the environment and public health. The purpose of this study was to assess the radiation-hygienic condition of the sites of peaceful

Kseniya V. Varfolomeeva

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

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

nuclear explosions "Globus-3" and "Quartz-2" in the Komi Republic. **Materials and Methods:** In July–August 2021, field studies were conducted in the Komi Republic in the territories adjacent to the sites of peaceful nuclear explosions "Globus-3" and "Quartz-2". These studies included measuring the ambient dose equivalent rate, the content of anthropogenic radionuclides in soil, and the specific activity of tritium in water bodies and drinking water sources in the nearest settlements. The ambient dose equivalent rate was measured using an MKG-AT1321 spectrometer. Identification of gamma-emitting radionuclides on the ground was carried out using a scintillation portable gamma-spectrometer MKSP-01. The specific activity of tritium in water samples was determined using a liquid scintillation spectrometer "Quantulus-1220." **Results and Discussion:** The measured ambient dose equivalent rate of gamma radiation in all surveyed territories corresponded to the natural radiation background: in the territory of the peaceful nuclear explosion "Globus-3," the values ranged from 0.01 to 0.04 $\mu\text{Sv/h}$, and in the territory "Quartz-2," from 0.01 to 0.06 $\mu\text{Sv/h}$. No soil areas contaminated with anthropogenic radionuclides were detected in the investigated territories. The values of tritium specific activity in drinking water samples did not exceed 5.34 Bq/kg, which is significantly lower than the established hygienic standard (7,600 Bq/kg) and corresponded to background values. Additional anthropogenic exposure due to tritium intake with drinking water from centralized water supply systems did not exceed 0.05 $\mu\text{Sv/year}$. **Conclusion:** The radiation situation in the areas of peaceful nuclear explosions "Globus-3" and "Quartz-2" meets the requirements of SanPiN 2.6.1.2819-10 and does not create health risks for the local population. However, the unsatisfactory sanitary condition of the protection zones of these facilities was noted. The presented results are of practical importance for future studies and may serve as a basis for bringing the protection zones into compliance with the requirements of paragraph 3.5 of Section 3 of SanPiN 2.6.1.2819-10.

Key words: peaceful nuclear explosions, tritium, Komi Republic, "Globus-3", "Quartz-2", radionuclides, environment, radiological protection, radioactive contamination.

Authors' personal contribution

Kseniya V. Varfolomeeva carried out registration of measurement results, performed literature data search, prepared illustrative material for the article, prepared the final version of the article for publication in the journal.

Konstantin A. Sednev carried out sampling, field measurements and photography in the field, processed and systematized primary research materials, analyzed data, prepared the draft manuscript and illustrative material for the article.

Artem M. Biblin supervised the implementation of field studies, conducted part of the sampling, analyzed the literature data, prepared illustrative material for the article, edited the intermediate version of the article.

Sergey A. Ivanov carried out sampling, field spectrometry, systematization of primary research materials and data analysis.

Svetlana A. Zelentsova carried out registration of measurement results, analyzed literature data, edited the draft manuscript, finalized the article for publication in the journal.

Viktor S. Repin carried out general management of the research work, performed processing of field spectra and tritium measurement spectra, proposed a form of displaying the sanitary condition of the PNE territory, edited manuscript.

Antonina G. Georgieva organized the field research work, edited the draft manuscript.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the employees of the Komi Republic State Institution «Kadzherskoe Ilesnichestvo» for invaluable assistance in transporting the participants of field studies to the sites of PNEs. We thank the reviewers for their constructive comments and suggestions, which contributed to improve the quality of the article.

Conflict of interests

The authors declare no 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 Rospo-

tebnadzor 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: "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. Abramov AA, Linge II, Dorofeev AN, Tyazhkorob ZhV, Savkin MN, Vedernikova MV, et al. Special radioactive waste. Edited by II Linge. Moscow: SAMpolygraphist LLC; 2015. 240 p. (In Russian).
3. Shandala NK, Kiselev SM, Titov AV. Scientific and practical experience of supervisory activities in the field of the public and environmental protection at the Russian nuclear legacy sites. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2 (special issue)): 83–96. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2s-83-96.
4. Ramzaev VP, Repin VS. Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the "Taiga" peaceful underground nuclear explosions site (the Perm region, Russia). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 148–159. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2024-17-2-148-159.
5. Peaceful Nuclear Explosions: Ensuring general and radiation safety during their conduct. Collective authors under the editorship of prof. VA Logachev. Moscow: IzdAT; 2001. 519 p. (In Russian).
6. Repin VS, Ramzaev VP, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Zelentsova SV, Sednev KA, et al. Estimation of the protected zone sizes for peaceful nuclear explosions based on quantitative patterns of the Earth's interior deformation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 134–147. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2023-16-4-134-147.
7. Khramtsov EV. Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion «Globus-1» before performing the rehabilitation works. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 81–88. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-81-88.
8. Khramtsov EV. Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion «Globus-1» after performing the rehabilitation works. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 58–68. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-3-58-68.

9. Titov AV, Shandala NK, Isaev DV, Belskikh IS, Semenova MP, Doronova TA, et al. Assessment of the Radiation Situation in the Area of the Peaceful Nuclear Explosion «Takhata-Kugulta». *Medicinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2021;66(2): 13–22. (In Russian). DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-13-22.
10. Titov AV, Shandala NK, Belskikh IS, Isaev DV, Gushchina IaV, Doronova TA, et al. The Radiation Situation in the Area of the Meteorit-5 Peaceful Nuclear Explosion. *Radioactive Waste*. 2021;16(3): 94–102. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-94-102.
11. 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 Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 111–123. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2021-14-1-111-123.
12. Yakovlev E, Puchkov A, Bykov V. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities of the Pechora River estuary: Bottom sediments and water (Arctic Ocean Basin). *Marine Pollution Bulletin*. 2021;172: 112765. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112765.
13. Biblin AM, Khramtsov EV, Repin VS, Ivanov SA, Varfolomeeva KV, Sednev KA, et al. Radiation situation at the «Pirit» peaceful underground nuclear explosion site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 149–161. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2022-15-4-149-161.
14. Biblin AM, Varfolomeeva KV, Sednev KA, Ivanov SA, Repin VS, Georgieva AG. Modern radiation-hygienic state of the territories of the Globus-4 and Gorizont-1 peaceful nuclear explosions in the Komi Republic. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 121–130. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2024-17-1-121-130.
15. Ramzaev V, Repin V. Activity concentrations of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{241}Am in sieved soil and soil inclusions from the «Taiga» peaceful nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 79–92. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2024-17-3-79-92.
16. Ramzaev V, Biblin A, Repin V, Khramtsov E, Varfolomeeva K. Tritium contamination of surface and ground waters at the «Dnepr» peaceful underground nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(1): 6–26. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2022-15-1-6-26.
17. Repin V, Varfolomeeva K, Biblin A, Zelentsova S, Sednev K, Arkhangelskaya G. Tritium content in water bodies in regions of peaceful nuclear explosions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 67–78. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2024-17-3-67-78.
18. Ramzaev VP, Repin VS, Khramtsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 27–33. (In Russian).
19. Ramzaev VP, Medvedev AY, Repin VS, Timofeeva MA, Khramtsov EV. Radiation monitoring the industrial nuclear explosion sites and evaluation of the doses to the critical groups of population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1): 33–39. (In Russian).
20. Characteristics of the MCGP-01 Device. Available from: <https://clck.ru/3G4HZV> (Accessed: 13 Jan. 2025). (In Russian).
21. Repin V, Sednev K. Spectrum processing method for measuring low levels of specific activity of ^{137}Cs with a NaI(Tl) detector in the presence of natural radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 142–148. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2022-15-4-142-148.
22. State Report «On the State of the Environment of the Komi Republic in 2021» / Ministry of Natural Resources of the Komi Republic; edited by State Budgetary Institution of the Komi Republic «TFI RK». Electronic version. Syktyvkar: Ministry of Natural Resources of the Komi Republic. 2022; 167. Available from: <https://clck.ru/3FugUS>. (Accessed: 14 Jan. 2025). (In Russian).

Received: January 27, 2025

For correspondence: Kseniya V. Varfolomeeva – 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 (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: varfolomeeva_K@mail.ru)

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, Saint Petersburg, Russia

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

Sergey A. Ivanov – Junior Researcher, 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

Svetlana A. Zelentsova – 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, Saint Petersburg, Russia

Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Antonina G. Georgieva – Chief Expert Specialist, Administration of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Republic of Komi in Usinsk, Usinsk, Russia

For citation: Varfolomeeva K.V., Sednev K.A., Biblin A.M., Ivanov S.A., Zelentsova S.A., Repin V.S., Georgieva A.G. Radiation-hygienic characteristics and sanitary condition of the territories of the Globus-3 and the Quartz-2 peaceful nuclear explosions in the Komi Republic. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 100–111. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-100-111.

Новые методические рекомендации по радиационному контролю участков территории для их санитарно-эпидемиологической оценки по показателям радиационной безопасности

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

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

Введение: В статье представлен обзор новых методических рекомендаций МР 2.6.1.0361-24, утвержденных 24.12.2024 взамен методических указаний МУ 2.6.1.2398-08, определявших порядок проведения радиационного контроля земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения для их санитарно-эпидемиологической оценки по показателям радиационной безопасности в течение последних 16 лет. *Краткое содержание:* При актуализации документа была расширена область его применения, которая теперь включает не только участки под строительство, но и прилегающую к зданиям и сооружениям территорию и территории общего пользования, а также находящийся на участках грунт, предназначенный для использования в качестве строительных материалов. Условия соответствия показателей радиационной безопасности установленным нормативам были скорректированы для исключения противоречий с действующими формулировками санитарно-эпидемиологических требований. Для оценки потенциальной радоноопасности участков территории предложен трехэтапный подход, в соответствии с которым у заказчика имеется возможность как заказать обследование на любом из этапов, так и закончить его после любого этапа в случае несоответствия участка установленным нормативам, отказавшись от проведения дополнительных измерений и перейдя сразу к стадии проектирования радонозащитных мероприятий. *Заключение:* Внесенные изменения должны сделать процедуру проведения радиационного контроля участков территории и оценки его результатов более понятной и прозрачной, а также повысить качество измерительной информации, получаемой аккредитованными испытательными лабораториями, не требуя от них существенного расширения приборного парка и перечня применяемых методов измерений. В совокупности это должно способствовать росту количества новых радонобезопасных зданий, в которых защитные меры реализуются превентивно.

Ключевые слова: радиационный контроль, показатели радиационной безопасности, земельный участок, прилегающая территория, территория общего пользования, плотность потока радона, мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, локальная радиационная аномалия.

Введение

В конце XX века в России активно проводились работы по внедрению радиационного контроля в практику инже-

нерных изысканий для строительства^{1,2}. В системе государственного санитарно-эпидемиологического нормирования Российской Федерации^{3,4} с 2000 г. нормируемыми показателями радиационной безопасности участков территории

¹Инженерные изыскания для строительства. Основные положения: Строительные нормы и правила Российской Федерации СНиП 11-02-96. Приняты и введены в действие с 01.11.1996 постановлением Минстроя России от 29.10.1996 № 18-77. [Building code SNiP 11-02-96 "Engineering survey for construction. Basic principles". Approved and put into effect by the order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia of 29.10.1996 No. 18-77. Expired. (In Russ.)]

²Инженерно-экологические изыскания для строительства: Свод правил по проектированию и строительству СП 11-102-97. Принят и введен в действие с 15.08.1997. [Building code SP 11-102-97 "Engineering environmental site investigations for construction". Approved and put into effect from 15.08.1997. Expired. (In Russ.)]

³Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18115). (In Russ.)]

⁴Гигиенические 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 № 9587). [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 27.01.2011, registration No. 19587). (In Russ.)]

Кононенко Дмитрий Викторович

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

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: d.kononenko@niirg.ru

(земельных участков) являются мощность дозы гамма-излучения и плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта (основной признак потенциальной радоноопасности территории, подлежащий определению при радиационном контроле). Соответствующая процедура проведения радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки участков территории под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения была введена на федеральном уровне в 2008 г. и закреплена в действовавших до конца 2024 г. методических указаниях (МУ) 2.6.1.2398-08⁵ (до этого подобный документ существовал только на региональном уровне⁶ для обеспечения выполнения соответствующих требований⁷).

Проведение оценки потенциальной радоноопасности участков территории в рамках инженерно-экологических изысканий является превентивной мерой, позволяющей на стадии проектирования зданий и сооружений прогнозировать возможное превышение уровня содержания радона в воздухе помещений и, таким образом, избежать дополнительных расходов на радонозащитные мероприятия после окончания строительства, реализация которых по разным (в первую очередь, финансовым) причинам до сих пор остается на довольно низком уровне, что является актуальной проблемой обеспечения радиационной безопасности населения России [1, 2]. В последние годы во многих субъектах РФ при обследовании зданий, построенных и введенных в эксплуатацию без учета радиационных характеристик территории⁸ и применяемых строительных материалов^{9,10}, выявлялись помещения, в которых содержание радона в воздухе превышало установленные гигиенические нормативы [3, 4].

Алгоритм оценки потенциальной радоноопасности, описанный в МУ 2.6.1.2398-08, имел как свои достоинства, так и недостатки, что было выявлено за прошедшие годы в ходе практического применения этого документа и целого ряда исследовательских работ, проведенных различными научными коллективами [5]. За 16 лет применения МУ 2.6.1.2398-08 ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, как основному разработчику документа, поступило множество запросов от аккредитованных испытательных лабораторий (ИЛ) и территориальных органов Роспотребнадзора о трактовке тех или иных пунктов этих методических указаний, а также предложений по их улучшению.

За прошедшие с момента утверждения МУ 2.6.1.2398-08 годы было принято значительное количество новых и пересмотренных Федеральных законов (Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»), документов по стандартизации (ГОСТ 8.638–2013¹¹, ГОСТ 34100.3–2017¹²), методических документов Роспотребнадзора, отдельные положения которых прямо или косвенно связаны с процедурой проведения радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки участков территории. Кроме того, произошли серьезные изменения в деятельности ИЛ, связанные с созданием и развитием национальной системы аккредитации (Федеральный закон от 28.12.2013 № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации», Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» с изменениями и дополнениями), в рамках

⁵Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2398-08. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 02.07.2008. [Radiation survey and sanitary assessment of land plots for construction of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety. Guidelines MU 2.6.1.2398-08. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 02.07.2008. Expired. (In Russ.)]

⁶Определение плотности потока радона на участках застройки: Временные методические указания ВМУ Р1-97. Утверждены Главным врачом ЦГСЭН в г. Москве и Заместителем председателя Москомархитектуры 02.06.1997. [Determination of radon flux density on building sites. Temporary Guidelines VMU R1-97. Approved by the Chief doctor of the State Sanitary and Epidemiological Surveillance Center in Moscow, and Deputy Chairman of the Moscow Architecture Department 02.06.1997. Expired. (In Russ.)]

⁷Допустимые уровни ионизирующего излучения и радона на участках застройки: Московские городские строительные нормы МГСН 2.02-97. Приняты и введены в действие постановлением Правительства Москвы от 04.02.1997 № 57. [Moscow City Building Standards MGSN 2.02-97 "Permissible levels of ionizing radiation and radon on building sites". Adopted and put into effect by the Resolution of the Moscow City Government of 04.02.1997 No. 57. Expired. (In Russ.)]

⁸Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99): Санитарные правила СП 2.6.1.799-99. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 27.12.1999. [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB-99). Sanitary rules SP 2.6.1.799-99. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation 27.12.1999. Expired. (In Russ.)]

⁹Временные критерии для организации контроля и принятия решений «Ограничение облучения населения от природных источников ионизирующего излучения». Утверждены Главным Государственным санитарным врачом СССР 10.06.1991 № 5789-91. Срок действия – до 01.01.1994. [Temporary criteria for organization of control and decision-making "Limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation". Approved by the Chief state sanitary doctor of the USSR on 10.06.1991 No. 5789-91. Expired 01.01.1994. (In Russ.)]

¹⁰Нормы радиационной безопасности (НРБ-96): Гигиенические нормативы ГН 2.6.1.054-96. Утверждены постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 19.04.1996 № 7. [Norms of radiation safety (NRB-96). Hygienic norms GN 2.6.1.054-96. Approved by the resolution of the State Committee for Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Russian Federation of 19.04.1996 No. 7. Expired. (In Russ.)]

¹¹ГОСТ 8.638–2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения». Введен в действие приказом Росстандарта от 13.03.2014 № 138-ст. [Interstate Standard GOST 8.638–2013 "State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological ensuring of radiation control. General principles". Put into effect by the order of Rosstandart of 13.03.2014 No. 138-st. (In Russ.)]

¹²ГОСТ 34100.3–2017 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения». Введен в действие приказом Росстандарта от 12.09.2017 № 1065-ст. [Interstate Standard GOST 34100.3–2017 "Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement" (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT). Put into effect by the order of Rosstandart of 12.09.2017 No. 1065-st. (In Russ.)]

которой ИЛ также руководствуются рядом новых документов по стандартизации (ГОСТ ISO/IEC 17025–2019¹³, ГОСТ Р 58973–2020¹⁴).

Таким образом, совокупность изложенных выше причин определила актуальность переработки МУ 2.6.1.2398-08, которая была проведена в 2024 г. в соответствии с государственным заданием. Текст новых методических рекомендаций (МР) 2.6.1.0361-24¹⁵ опубликован на официальном сайте Роспотребнадзора¹⁶, а издание и обеспечение органов Роспотребнадзора и других заинтересованных организаций новыми МР будет осуществлено ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора¹⁷.

Основные изменения и нововведения в процедуре радиационного контроля участков территории

Проект актуализированных МР был подготовлен на основе результатов критического рассмотрения положений МУ 2.6.1.2398-08, анализа актуальных требований законодательства и документов по стандартизации, а также накопленного за 16 лет массива замечаний и предложений по улучшению алгоритмов проведения радиационного контроля. Поскольку методические документы не могут содержать новых обязательных требований или нормативов (согласно ч. 5 ст. 14 Федерального закона № 247-ФЗ от 31.07.2020 (ред. от 08.08.2024) «Об обязательных требованиях в Российской Федерации»), перечень контролируемых показателей радиационной безопасности остался неизменным. Обзор существующих подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков [5] показал, что в ряде стран эта оценка базируется не на результатах измерений ППП с поверхности грунта (которая отличается существенной вариабельностью), а на результатах измерений объемной активности (ОА) радона в почвенном воздухе и газопроницаемости грунтов, и ряд российских специалистов и авторских коллективов выступает за изменение нормируемой величины. Однако, кроме законодательных препятствий к внедрению в проект актуализированных МР новых или дополнительных показателей,

до настоящего времени сохраняется и целый ряд нерешенных научно-практических проблем:

- для ОА радона в почвенном воздухе также характерна значительная вариабельность до глубин порядка 3 м;
- нет единого мнения о том, следует ли учитывать газопроницаемость грунтов;
- средства измерений (СИ) ОА радона в почвенном воздухе в РФ имеют достаточно ограниченное распространение (т.к. это не нормируемый показатель);
- СИ газопроницаемости грунтов *in situ* в государственном реестре средств измерений (ГРСИ) – ФГИС Росстандарта, подсистема «АРШИН»¹⁸, отсутствуют;
- экспериментальные установки, разработанные некоторыми авторскими коллективами для научных исследований, пока не доведены до состояния серийных образцов или включают в себя средства измерений стоимостью в несколько млн руб. (например, радиометр AlphaGUARD [6]);
- измерения ОА радона в почвенном воздухе на территориях, где скальные породы залегают близко к поверхности, практически неосуществимы;
- математической модели, с достаточной точностью связывавшей бы ППП с поверхности грунта с ОА радона в почвенном воздухе, газопроницаемостью грунта и рядом климатических параметров, никем в мире до сих пор не создано.

Тем не менее, анализ достаточно длительной практики применения МУ 2.6.1.2398-08 показал, что с учетом текущего уровня научных знаний, практического опыта и номенклатуры доступных типов СИ может быть улучшен ряд составляющих алгоритмов проведения радиационного контроля, оценки потенциальной радоноопасности и санитарно-эпидемиологической оценки участков территории:

1. Использование в МУ 2.6.1.2398-08 для оценки соответствия земельных участков санитарно-эпидемиологическим требованиям по мощности дозы гамма-излучения и ППП с поверхности грунта средних арифметических значений этих показателей по территории участка не соответствует самим формулировкам нормативов в ОСПОРБ 99/2010 (пп. 5.1.6 и 5.2.3) и СанПиН 2.6.1.2800-10 (пп. 4.2.2 и 3.2.4). В указанных санитарных

¹³ГОСТ ISO/IEC 17025–2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». Введен в действие приказом Росстандарта от 15.07.2019 № 385-ст. [Interstate Standard GOST ISO/IEC 17025–2019 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories” (ISO/IEC 17025:2017, IDT). Put into effect by the order of Rosstandart of 15.07.2019 No. 385-st. (In Russ.)]

¹⁴ГОСТ Р 58973–2020 «Оценка соответствия. Правила к оформлению протоколов испытаний». Утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 27.08.2020 № 563-ст. [National Standard of the Russian Federation GOST R 58973–2020 “Conformity assessment. Rules for registration of test reports”. Approved and put into effect by the order of Rosstandart of 27.08.2020 No. 563-st. (In Russ.)]

¹⁵Радиационный 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.)]

¹⁶Официальный сайт Роспотребнадзора – Документы – Методические документы. МР 2.6.1.0361-24. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=29374 (Дата обращения: 21.02.2025) [Official site of Rosпотребнадзора – Documents – Methodological documents. MR 2.6.1.0361-24. Available from: https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=29374 [Accessed 21 Feb 2025] (In Russ.)]

¹⁷Положение о порядке разработки, экспертизы и утверждения информационно-методических документов Роспотребнадзора. Утверждено Приказом Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 12.02.2013 № 62. [Regulations on the procedure for development, examination and approval of information and methodological documents of Rosпотребнадзора. Approved by the Order of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing of 12.02.2013 No. 62. (In Russ.)]

¹⁸Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (Дата обращения: 21.02.2025) [Federal Information Fund for ensuring the uniformity of measurements. Approved types of measuring instruments. Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> [Accessed 21 Feb 2025]. (In Russ.)]

правилах отсутствуют требования об усреднении полученных результатов измерений; более того, использование в качестве оценки среднего значения ППР с поверхности грунта на земельном участке среднего арифметического (а не среднего геометрического) уже является некорректным, так как распределение значений ППР с поверхности грунта по площади участка носит логнормальный характер (а не нормальный) [5]. В связи с этим в МР 2.6.1.0361-24 условия соответствия участков территории санитарно-эпидемиологическим требованиям по мощности дозы гамма-излучения (1) и ППР с поверхности грунта (2) представлены в следующем виде:

$$H_{\max} + U(H_{\max}) \leq H_{\text{норм}}, \text{ мкЗв/ч}, \quad (1)$$

где $H_{\max}$, мкЗв/ч – наибольший из полученных результатов измерений мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения в контрольных точках на участке территории;

$U(H_{\max})$, мкЗв/ч – расширенная неопределенность измерений $H_{\max}$ с коэффициентом охвата $k=2$;

$H_{\text{норм}}=0,3$ мкЗв/ч для участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного назначения и $H_{\text{норм}}=0,6$ мкЗв/ч для участков под строительство зданий и сооружений производственного назначения;

$$R_{\max} + U(R_{\max}) \leq R_{\text{норм}}, \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}, \quad (2)$$

где $R_{\max}$, мБк/(м²·с) – наибольший из полученных результатов измерений ППР с поверхности грунта в контрольных точках на участке территории;

$U(R_{\max})$, мБк/(м²·с) – расширенная неопределенность измерений $R_{\max}$ с коэффициентом охвата $k=2$;

$R_{\text{норм}}=80$ мБк/(м²·с) для участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного назначения и $R_{\text{норм}}=250$ мБк/(м²·с) для участков под строительство зданий и сооружений производственного назначения.

2. В МР 2.6.1.0361-24 (по аналогии с МР 2.6.1.0333-23¹⁹) внесен пункт, разъясняющий порядок сравнения результатов измерений параметров радиационной обстановки с установленными гигиеническими нормативами: согласно п. 7.4 ГОСТ 8.638–2013, решение о соответствии контролируемого показателя радиационной безопасности установленному нормативу принимается с учетом оцененной расширенной неопределенности измерений (с коэффициентом охвата $k=2$, соответствующим

интервалу с уровнем доверия, близким к 95 %). В связи с этим все математические условия, использующиеся в МР 2.6.1.0361-24, переработаны с учетом современных подходов к выражению неопределенности измерений, а в необходимых случаях приведены формулы для расчета суммарной неопределенности (для показателей, рассчитываемых на основе результатов измерений нескольких физических величин, – например, эффективной удельной активности природных радионуклидов (ПРН)).

3. Предложен трехэтапный контроль ППР с поверхности грунта: по всей площади участка территории (при отсутствии привязки проектируемого здания или сооружения на участке); в пределах площади застройки (пятна застройки); на отметке заложения подошвы фундамента. Окончательное решение о несоответствии участка территории санитарно-эпидемиологическим требованиям по ППР с поверхности грунта может быть вынесено только после прохождения третьего этапа. Но при этом у заказчика имеется возможность как заказать обследование на любом из этих этапов, так и закончить его после любого этапа в случае несоответствия участка установленным санитарно-эпидемиологическим требованиям по ППР с поверхности грунта. Предложенный подход дает заказчику обоснованную свободу выбора между проведением дополнительных измерений (т.е. следующего этапа контроля) или отказом от них и переходу к стадии проектирования радонозащитных мероприятий в соответствии с СП 321.1325800.2017²⁰. Такой подход обеспечивает выполнение требований, установленных нормативными документами, и при этом не создает предпосылок для необоснованного давления на субъекты предпринимательской деятельности.

4. Объемы контроля (количество контрольных точек для измерения МАЭД гамма-излучения и ППР с поверхности грунта и плотность профилей для поисковой гамма-съемки в зависимости от площади участка территории) не претерпели изменений по сравнению с МУ 2.6.1.2398-08. Вместе с тем введены дополнительные условия проведения измерений. Так, проведение измерений ППР с поверхности грунта допустимо только при отсутствии в контрольных точках покрытия (согласно СП 476.1325800.2020²¹, это слой из твердого, мягкого или газонного материала, устраиваемый поверх грунта при благоустройстве территории) за исключением газонного материала, поскольку наличие в точке измерения покрытий делает в принципе невозможным корректное определение контролируемого показателя (слой материала нарушает или полностью перекрывает поток радона с поверхности грунта).

¹⁹ 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.)]

²⁰ Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты: Свод правил СП 321.1325800.2017. Утвержден приказом Министра России от 05.12.2017 № 1616/пр. [Building code SP 321.1325800.2017 "Residential and public buildings. Regulations for designing of protection against radon". Approved by the order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia of 05.12.2017 No. 1616/pr. (In Russ.)]

²¹ Территории городских и сельских поселений. Правила планировки, застройки и благоустройства жилых микрорайонов: Свод правил СП 476.1325800.2020. Утвержден и введен в действие приказом Министра России от 24.01.2020 № 33/пр. [Building code SP 476.1325800.2020 "Territories of urban and rural settlements. Rules of planning, construction and improvement of residential micro-regions". Approved and put into effect by the order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia of 24.01.2020 No. 33/pr. (In Russ.)]

5. Введена рекомендация не проводить измерения МАЭД гамма-излучения во время дождя и в течение трех часов после его окончания: в этой ситуации возможно влияние гамма-излучения короткоживущих дочерних продуктов распада радона (^{214}Pb и ^{214}Bi), выпадающих на поверхность вследствие вымывания из нижних слоев атмосферы [7–9].

6. Нередко возникает ситуация, когда на отводимом под строительство участке территории расположены здания или сооружения, предназначенные для сноса. Такая ситуация характерна, в первую очередь, для районов крупных населенных пунктов, в которых проводится реновация [10]. В МУ 2.6.1.2398-08 порядок действий в такой ситуации не был определен. В соответствии с п. 4.3 МР 2.6.1.0361-24 радиационный контроль зданий или сооружений, предназначенных для сноса, в случае их наличия на обследуемом участке территории, проводится в соответствии с действующими МР по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности (МР 2.6.1.0333-23, глава VII).

7. Еще одной ситуацией, часто возникающей при обследовании участков территорий, является наличие на них грунтов (в виде конуса, брусвера, насыпи или еще не снятого слоя), предназначенных для использования в качестве строительных материалов (например, для обратной засыпки, благоустройства территории в соответствии с п. 5.15.9.2 СП 502.1325800.2021²²), на которые распространяются требования п. 5.3.4 НРБ-99/2009²³. В МУ 2.6.1.2398-08 порядок радиационного контроля таких грунтов также не был определен. В соответствии с п. 4.17 МР 2.6.1.0361-24 их радиационный контроль проводится по аналогии с контролем территории (поисковая гамма-съемка с целью выявления радиационных аномалий) с дальнейшим отбором проб для проведения спектрометрических испытаний. Использование грунтов, содержащих только ПРН, осуществляется в соответствии с санитарно-эпидемиологическими требованиями на основании результатов определения эффективной удельной активности ПРН в отобранных пробах грунтов.

8. Несмотря на то, что в МУ 2.6.1.2398-08 рассматривалась ситуация с обнаружением в ходе радиационного контроля техногенных радионуклидов (в том числе в виде источников ионизирующего излучения), порядок детализации такого участка радиоактивного загрязнения (УРЗ) ничем не отличался от порядка детализации локальной радиационной аномалии (ЛРА), обусловленной присутствием только ПРН (п. 5.2.3 МУ 2.6.1.2398-08).

Между тем, согласно п. 1.8 ОСПОРБ 99/2010, «Деятельность в области использования техногенных источников ионизирующего излучения и (или) обращения с радиоактивными отходами осуществляется при наличии специального разрешения (лицензии) на право осуществления этой деятельности, выданного органами, уполномоченными осуществлять лицензирование»; при этом значительная часть аккредитованных ИЛ, проводящих радиационный контроль участков территории, соответствующей лицензии не имеет. Поэтому для соблюдения требований п. 1.8 ОСПОРБ 99/2010 и исключения ситуаций, когда в такую ИЛ доставляется проба грунта, содержащая техногенные радионуклиды (согласно Приложению 3 ОСПОРБ 99/2010) с удельными активностями, превышающими соответствующие минимально значимые удельные активности (согласно Приложению 4 НРБ-99/2009), в соответствии с п. 4.10 МР 2.6.1.0361-24 проводится идентификация гамма-излучающих радионуклидов в точках с максимальными значениями МАЭД гамма-излучения для определения радионуклидного состава радиационной аномалии. В случае обнаружения техногенных радионуклидов участок радиационной аномалии классифицируется как УРЗ, а детализация и ликвидация (деактивация) УРЗ осуществляется в соответствии с санитарно-эпидемиологическими требованиями силами лицензированной организации (п. 3.11.7 ОСПОРБ 99/2010).

9. Для проверки наличия технической возможности проводить идентификацию гамма-излучающих радионуклидов в полевых условиях был осуществлен поиск соответствующих портативных (носимых) типов СИ в ГРСИ, в результате которого были идентифицированы 10 подходящих типов СИ четырех разных производителей, перечисленные в таблице. Требования к техническим характеристикам (диапазону энергий регистрируемого гамма-излучения) таких СИ приведены в п. 3.5 МР 2.6.1.0361-24.

10. В МР 2.6.1.0361-24 (по аналогии с МР 2.6.1.0333-23) значения контрольных уровней показаний поисковых приборов, используемых в процессе гамма-съемки для предварительной идентификации возможных радиационных аномалий, выражены как в единицах МАЭД (мкЗв/ч), так и в единицах мощности экспозиционной дозы (мкР/ч), поскольку во многих ИЛ для проведения гамма-съемки до сих пор используются поисковые приборы, не имеющие градуировки в единицах МАЭД (например, СРП-68-01, СРП-88Н, СРП-97).

²²Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ: Свод правил СП 502.1325800.2021. Утвержден приказом Минстроя России от 16.07.2021 № 475/пр. [Building code SP 502.1325800.2021 "Engineering environmental survey for construction. General regulations for execution of work". Approved by the order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia of 16.07.2021 No. 475/pr. (In Russ.)]

²³Нормы 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.)]

**Перечень портативных (носимых) средств измерений с функцией идентификации радионуклидов,
внесенных в ГПСИ**

[Table]

**Portable measuring instruments with the function of radionuclides identification
listed in the State Register of Measuring Instruments (SRMI)]**

№ ГПСИ [SRMI No.]	Тип СИ [Measuring instrument type]	Страна-производитель [Manufacturing country]	Энергетический диапазон, кэВ [Gamma-ray energy range, keV]
77614-20	Спектрометры энергии гамма-излучения сцинтилляционные портативные ГАММА-1С/НВ1-03, ГАММА-1С/НВ1-04 [Portable gamma-ray energy scintillation spectrometers GAMMA-1C/NB1-03, GAMMA-1C/NB1-04]	Россия [Russia]	50–3000
87794-22	Спектрометр МКС-АТ6101 [Spectrometer MKS-AT6101]	Беларусь [Belarus]	20–3000
54115-18	Спектрометр МКС-АТ6101ДР [Spectrometer MKS-AT6101DR]	Беларусь [Belarus]	50–3000
44235-20	Спектрометр МКС-АТ6102А [Spectrometer MKS-AT6102A]	Беларусь [Belarus]	20–3000
44235-20	Спектрометр МКС-АТ6102В [Spectrometer MKS-AT6102V]	Беларусь [Belarus]	20–3000
87793-22	Спектрометр МКГ-АТ1321 [Spectrometer MKG-AT1321]	Беларусь [Belarus]	20–3000
89014-23	Дозиметр-радиометр поисковый МКС-РМ1401К-3, МКС-РМ1401К-3М [Radiation survey meter MKS-RM1401K-3, MKS-RM1401K-3M]	Беларусь [Belarus]	15–15000
82802-21	Дозиметр-радиометр МКС-РМ1403 с детектором БДГЗ и блоком детектирования и обработки информации БДОИ [Radiation survey meter MKS-RM1403 with detector BDG3 and data processing unit BDOI]	Беларусь [Belarus]	50–3000
85578-22	Спектрометр Detective X, X-N [Spectrometer Detective X, X-N]	США [USA]	40–3000
85578-22	Спектрометр Detective X-8, X-8-N [Spectrometer Detective X-8, X-8-N]	США [USA]	40–8000

Для этих типов участков в МР 2.6.1.0361-24 включены рекомендации, чтобы мощность дозы гамма-излучения на прилегающей к жилым и общественным зданиям территории и на территории общего пользования (за исключением автомобильных дорог) соответствовала санитарно-эпидемиологическим требованиям, предъявляемым к земельным участкам под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного назначения, а мощность дозы гамма-излучения на прилегающей к производственным зданиям и сооружениям территории и на автомобильных дорогах (в том числе на земельном участке в границах полосы отвода автомобильной дороги) соответствовала санитарно-эпидемиологическим требованиям, предъявляемым к земельным участкам под строительство зданий и сооружений производственного назначения.

В отношении территории объектов культурного наследия (ст. 3.1 Федерального закона от 25.06.2002 № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации») оценка соответствия санитарно-эпидемиологическим требованиям не проводится как таковая: в случае обнаружения превышений (например, ЛРА) следует проинформировать об этом факте заказчика и при необходимости провести оценку возможных доз облучения работников и посетителей для принятия дальнейших управленческих решений.

МР 2.6.1.0361-24 были максимально унифицированы (структурно, терминологически и процедурно) с МР 2.6.1.0333-23, например, в части поисковой гамма-съемки с целью выявления возможных радиационных аномалий, поскольку эти два документа логически связаны друг с другом: так, МР по зданиям и сооружениям отправляет к МР по участкам территории при необходимости проведения контроля прилегающей территории, а МР по участкам территории отправляет к МР по зданиям и сооружениям в случае наличия на участке зданий и сооружений под снос.

Текст МР 2.6.1.0361-24 не содержит каких-либо требований, относящихся непосредственно к процессу выполнения измерений физических величин (что является прерогативой аттестованных методик (методов) измерений и руководств по эксплуатации СИ, которые включаются в область аккредитации ИЛ), и упоминаний любых необязательных количественных и качественных показателей (не являющихся контролируемыми показателями радиационной безопасности), определение которых требует от ИЛ наличия дополнительных СИ (например, «Проходя выбранные профили со скоростью не более 2 км/ч...» – п. 5.2.2 МУ 2.6.1.2398-08) или доступа к некой статистической информации (например, «...после установления влажности грунтов в осенний и весенний периоды или после интенсивных дождей до характерного для данной местности состояния» – п. 4.7 МУ 2.6.1.2398-08), что по тем

или иным причинам может оказаться невозможным и может привести к непреодолимым трудностям при прохождении ИЛ процедур аккредитации и подтверждения компетентности.

Отдельное внимание в МР 2.6.1.0361-24 уделено вопросам оценки неопределенности измерений показателей радиационной безопасности и представления результатов в отчетах: данная процедура детально описана в главе VII. Кроме того, в соответствии с п. 7.1 МР 2.6.1.0361-24 эту же процедуру рекомендуется использовать для оценки неопределенности измерений показателей радиационной безопасности при радиационном контроле зданий и сооружений согласно действующим МР 2.6.1.0333-23. Причины, по которым потребовалось включить в МР эти рекомендации, были изложены нами ранее в статье [11].

Заключение

Основное отличие новых МР 2.6.1.0361-24 от действовавших ранее МУ 2.6.1.2398-08 заключается в том, что в новом документе определен порядок организации и проведения радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки не только земельных участков под строительство зданий и сооружений различного назначения, в том числе линейных объектов, но и прилегающей к зданиям и сооружениям территории, территорий общего пользования, а также находящегося на участке территории грунта, предназначенного для использования в качестве строительных материалов. Некоторые изменения претерпели условия соответствия показателей радиационной безопасности установленным нормативам. Для оценки потенциальной радоноопасности участков территории предложен трехэтапный подход: контроль ППР с поверхности грунта по всей площади участка (при отсутствии привязки проектируемого здания или сооружения на участке); в пределах площади застройки (пятна застройки); на отметке заложения подошвы фундамента. Окончательное решение о несоответствии участка территории санитарно-эпидемиологическим требованиям по ППР с поверхности грунта может быть вынесено только после прохождения третьего этапа. Заказчик обследования имеет возможность привлечь аккредитованную ИЛ для проведения радиационного контроля участка на любом из этих этапов. При этом имеется возможность завершения обследования после любого этапа с отказом от проведения дополнительных измерений и переходом сразу к стадии проектирования радонозащитных мероприятий, что полностью обеспечивает выполнение требований, установленных нормативными документами, и при этом не создает предпосылок для необоснованного давления на субъекты предпринимательской деятельности. С учетом планов Правительства РФ довести к 2036 г. долю нового жилья в стране до 30 %²⁴, результатом применения предложенного подхода должен стать рост количества новых радионезопасных зданий, в которых защитные меры реализуются превентивно, что в будущем будет способствовать снижению как коллективной дозы за счет облучения радоном, так и индивидуальных рисков для здоровья населения.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кононенко Д.В. написал черновик рукописи, подготовил английский перевод и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Кормановская Т.А. отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Васильев А.С. провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. подготовил таблицу и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Разработка и научное обоснование рекомендаций по планированию, организации и внедрению программ по снижению уровней облучения населения от природных источников ионизирующего излучения на уровне субъектов Российской Федерации с целью уменьшения рисков заболеваемости населения злокачественными новообразованиями».

Литература

1. Гулябц Л.А., Калайдо А.В. Противорадиационная защита жилых и общественных зданий: монография. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 236 с.
2. Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению // АНРИ. 2024. № 1. С. 3–29. DOI: 10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.
3. Васильев А.С. Облучение обучающихся и сотрудников детских учреждений Ленинградской области природными источниками излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 65–77. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.
4. Кормановская Т.А., Историк О.А., Романович И.К. и др. Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений зданий детских учреждений // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
5. Васильев А.С., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Сапрыкин К.А. Обзор подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 142–153. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-142-153.
6. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Юрков И.А., Изгагин В.С. Оценка геогенного радонового потенциала с использованием активации адвективного потока воздуха из грунта // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 79–87. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-79-87.
7. Hiemstra P.H., Pebesma E.J., Heuvelink G.B.M., Twenhöfel C.J.W. Using rainfall radar data to improve interpolated maps of dose rate in the Netherlands // Science of the Total Environment. 2010. Vol. 409. P. 123–133. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.08.051.
8. Livesay R.J., Blessinger C.S., Guzzardo T.F., Hausladen P.A. Rain-induced increase in background radiation detected by Radiation Portal Monitors // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol. 137. P. 137–141. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.07.010.

²⁴Официальный сайт Правительства России. Новости. 20.02.2025, 16:15. URL: <http://government.ru/news/54292/> (Дата обращения: 21.02.2025) [Official site of the Government of Russia. News. 20.02.2025, 16:15. Available from: <http://government.ru/news/54292/> [Accessed 21 Feb 2025] (In Russ.)]

9. Amestoy J., Meslin P.-Y., Richon P. et al. Effects of environmental factors on the monitoring of environmental radioactivity by airborne gamma-ray spectrometry // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 237. P. 106695. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106695.
10. Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А. и др. Контроль показателей радиационной безопасности зданий и сооружений, подлежащих сносу // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 42–51. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-42-51.
11. 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.

Поступила: 02.02.2025

Кононенко Дмитрий Викторович – научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: d.kononenko@niirg.ru

ORCID: 0000-0002-1392-1226

Кормановская Татьяна Анатольевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0009-0005-7922-7367

Васильев Алексей Серафимович – младший научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-1277-3807

Сапрыкин Кирилл Александрович – старший научный сотрудник, заведующий лабораторией дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-2387-7051

Для цитирования: Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Новые методические рекомендации по радиационному контролю 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

New guidelines on radiation survey of land plots for their sanitary assessment in terms of radiation safety indicators

Dmitry V. Kononenko, Tatyana A. Kormanovskaya, Alexey S. Vasilyev, Kirill A. Saprykin

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

Introduction: The paper presents an overview of the new guidelines MR 2.6.1.0361-24 (approved on 24 December 2024) that supersede guidelines MU 2.6.1.2398-08, which were used for organizing radiation surveys of land plots for construction of residential buildings, public and industrial buildings and facilities, and their sanitary assessment in terms of radiation safety indicators over the past 16 years. Summary: The scope of the revised document was expanded and now covers not only construction sites, but also territories adjacent to buildings and structures, and public areas, as well as the soil located on the sites and intended for use as building materials. The conditions for compliance of radiation safety indicators with established standards have been adjusted to eliminate contradictions with the current formulations of sanitary requirements. A three-stage approach is proposed to assess the potential radon hazard of land plots. According to this approach, the customer has the opportunity to order a radiation survey at any stage and to complete it after any stage in case of non-compliance of the land plot with the established standards, skipping additional measurements and proceeding immediately to the design stage of radon protective measures. Conclusion: The changes made should make the procedure for conducting radiation survey of land plots and evaluating its results more understandable and transparent, as well as improve the quality of measurement information obtained by testing laboratories, without requiring them to significantly expand

Dmitry V. Kononenko

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

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

the measuring instruments fleet and the list of measurement methods used. Taken together, all this changes should contribute to an increase in the number of new radon-safe buildings where protective measures are implemented preventively.

Key words: radiation survey, radiation safety indicators, land plot, adjacent territory, public area, density of radon flux, ambient dose equivalent rate, local radiation anomaly.

Authors' personal contribution

Kononenko D.V. wrote the draft of the manuscript, translated the manuscript, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Kormanovskaya T.A. edited the interim version of the manuscript.

Vasilyev A.S. conducted a search and analysis of literature data, and edited the interim version of the manuscript.

Saprykin K.A. prepared the table and edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025 “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Development and scientific substantiation of recommendations for planning, organizing and implementing programs to reduce the levels of public exposure due to natural sources of ionizing radiation on the regional level in order to reduce the risks of malignant neoplasms morbidity of the population of the Russian Federation”.

References

1. Gulabyants L, Kalaydo A. Radon protection of residential and public buildings. Moscow; Berlin: DirectMEDIA; 2020. 236 p. (In Russian).
2. Tsapalov A, Miklyaev P, Petrova T, Kuvshinnikov S. Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation. *ANRI = ANRI*. 2024;1(116): 3–29. (In Russian). DOI: 10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.
3. Vasilyev AS. Exposure of students (pupils) and employees of educational institutions in the Leningrad region to natural sources of radiation. Part 1: Results of a comprehensive survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 65–77. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.
4. Kormanovskaya TA, Istoriik OA, Romanovich IK, Eremina LA, Koroleva NA, Balabina TA, et al. Radon surveys in the buildings of children institutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 6–20. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
5. Vasilyev AS, Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Saprykin KA. A review of approaches to assessment of potential radon hazard of land plots. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 142–153. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-142-153.
6. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Yurkov IA, Izgagin VS. Assessment of geogenic radon potential with activation of advective soil air flow. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(4): 79–87. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-79-87.
7. Hiemstra PH, Pebesma EJ, Heuvelink GBM, Twenhöfel CJW. Using rainfall radar data to improve interpolated maps of dose rate in the Netherlands. *Science of the Total Environment*. 2010;409: 123–133. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.08.051.
8. Livesay RJ, Blessinger CS, Guzzardo TF, Hausladen PA. Rain-induced increase in background radiation detected by Radiation Portal Monitors. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014;137: 137–141. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.07.010.
9. Amestoy J, Meslin P-Y, Richon P, Delpuech A, Derrien S, Raynal H, et al. Effects of environmental factors on the monitoring of environmental radioactivity by airborne gamma-ray spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;237: 106695. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106695.
10. Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Saprykin KA, Vasilyev AS, Koroleva NA, Kokoulina ES, et al. Radiation survey of buildings and structures to be demolished. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(2): 42–51. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-42-51.
11. Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Vasilyev AS, Saprykin KA. New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 1. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 138–147. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-138-147.

Received: February 02, 2025

For correspondence: Dmitry V. Kononenko – Researcher, Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: d.kononenko@niirg.ru)

ORCID: 0000-0002-1392-1226

Tatyana A. Kormanovskaya – 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, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0005-7922-7367

Alexey S. Vasilyev – Junior Researcher, Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-1277-3807

Kirill A. Saprykin – Senior Researcher, Head of the Laboratory for Dosimetry of Natural Sources of Radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-2387-7051

For citation: Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Vasilyev A.S., Saprykin K.A. New guidelines on radiation survey of land plots for their sanitary assessment in terms of radiation safety indicators. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 112–120. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-112-120

Компьютерная программа расчета внутриутробных доз от техногенных радионуклидов

Е.А. Шишкина^{1,2}, П.А. Шарагин¹, Е.И. Толстых¹

¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины,
Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации, Челябинск, Россия

Введение: В рамках дозиметрического сопровождения эпидемиологических исследований, проводимых для населения Уральского региона, была создана компьютерная программа для расчета доз внутриутробного облучения - «FetusDose». *Краткое содержание:* В статье описан принцип организации и функциональные возможности компьютерной программы. Программа предназначена для расчета триместровых и суммарных накопленных доз на красный костный мозг и внескелетные ткани плода при его облучении техногенными радионуклидами, аварийно попавшими в окружающую среду. Рассматриваются два сценария облучения: внешнее от загрязненной почвы гамма-излучающими радионуклидами (^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{144}\text{Ce}/^{144\text{m}}\text{Pr}$, $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$, ^{91}Y и $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$) и внутреннее от перорального поступления $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{89}Sr , $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ и $^{144}\text{Ce}/^{144\text{m}}\text{Pr}$ в организм матери с пищей и водой. *Заключение:* Программа может применяться как для изучения последствий уже случившихся радиационных инцидентов, так и для прогнозирования величины радиационного воздействия от потенциальных угроз. Программа также может быть полезна в учебных целях при подготовке специалистов в области радиобиологии и дозиметрии.

Ключевые слова: внутриутробное облучение, внутреннее облучение, внешнее облучение, плод, беременность, радионуклиды.

Введение

Человеческий организм в период внутриутробного развития чрезвычайно радиочувствителен. Тяжесть последствий облучения для здоровья зависит от стадии внутриутробного развития и от дозовой нагрузки [1–3]. Одним из примеров исследований в этой области является прослеживание когорты лиц, внутриутробно облучавшихся в результате радиоактивного загрязнения территорий Южного Урала, и оценка радиационных рисков [4, 5]. Важной составляющей этих работ является корректная оценка доз внутриутробного облучения. В рамках продолжающихся дозиметрических исследований на Южном Урале совершенствуются алгоритмы и программы расчета доз для населения.

Цель исследования – описание компьютерной программы «FetusDose» для расчета триместровых и суммарных накопленных доз на красный костный мозг (ККМ) и внескелетные ткани плода от техногенных радионуклидов, аварийно попавших в окружающую среду и в организм матери.

Методы расчета доз в программе «FetusDose»

Дозы облучения ККМ и внескелетных тканей рассчитываются для всего срока беременности и отдельно для триместров: 1) 1–12 недели; 2) 13–25 недель; 3) 26–38 недель. Дозы на ККМ в первый триместр равны нулю, поскольку минерализованная кость и ККМ не сформированы. Дозы внешнего облучения рассчитываются для сценариев загрязнения

почвы гамма-излучающими радионуклидами (^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{144}\text{Ce}/^{144\text{m}}\text{Pr}$, $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$, ^{91}Y и $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$) по данным о динамике мощности доз (Гр/с) в воздухе на высоте 1 м над уровнем почвы. Мощности доз задаются непосредственно, либо рассчитываются по вертикальному распределению удельной активности радионуклидов в почве [6]. Переход от мощности дозы в воздухе к дозам на плод в разные триместры осуществляется согласно [7–8].

Дозы внутреннего облучения плода зависят от времени между поступлением и родами. Они рассчитываются для $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{89}Sr , $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ и $^{144}\text{Ce}/^{144\text{m}}\text{Pr}$, поступивших в организм матери во время беременности или за некоторое время до наступления беременности (для ^{90}Sr – за 10 и менее лет; для остальных – менее 3 лет до родов). Расчет проводится на основе динамики поступления радионуклидов и комбинации биокинетических и дозиметрических моделей. Используются биокинетические модели ^{137}Cs и ^{144}Ce для матери до наступления беременности [9–10] и матери и плода [11]. Для изотопов Sr применяются оригинальные модели [12–13]. Переход к поглощенным дозам осуществляется с помощью соответствующих коэффициентов: для ^{144}Ce согласно [11]; для ^{137}Cs и $^{89,90}\text{Sr}$ согласно [14].

Программа реализована на платформе Python 3.11.1 и представляет собой исполняемый файл и дополнительные таблицы общим размером 270 Мб. Входные и выходные данные – в формате csv с разделителем “;”. Программа предназначена для использования на IBM PC совместимых компьютерах с операционными системами Windows 8 и старше.

Шишкина Елена Анатольевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

Описание программы «FetusDose»

На рисунке 1 показан интерфейс. Квадратные индикаторы предполагают возможность выбора нескольких вариантов. Так, можно рассматривать совместно внешнее и внутреннее облучение; можно выбрать один или несколько радионуклидов. Круглые индикаторы предполагают единственный выбор.

На левой панели устанавливаются параметры расчета доз внешнего облучения. Значения по умолчанию приняты на основе дозиметрических исследований, проводившихся в Уральском регионе. С помощью кнопки вверху панели загружается файл с историями облучения в виде таблицы (табл. 1).

Рис. 1. Интерфейс программы «FetusDose»

[Fig. 1. The interface of the FetusDose program]

Таблица 1

Базовая таблица входных данных; / – место контакта, t_1 – дата начала контакта;
 t_2 – дата конца контакта; R – режим поступления

[Table 1

The basic input data table; / is the place of the contact, t_1 is the date of the beginning of the contact;
 t_2 is the date of the end of the contact; R is the intake mode]

Код матери [Mother's code]	Дата рождения матери [Mother's birth date]	Код ребенка [Child's code]	Дата рождения ребенка [Child's birth date]	/	t_1	t_2	R	Поправка на возраст для ^{90}Sr [Age correction for ^{90}Sr]	Коэффициент индивидуализации для Sr [individualization factor for Sr]	Коэффициент индивидуализации для Cs [individualization factor for Cs]
191	03.05.1935	1537	02.06.1958	1	05.11.1957	02.04.1958	1	1	1	1
191	03.05.1935	1537	02.06.1958	2	05.11.1957	02.04.1958	2	1	1	1

Он должен содержать список реальных лиц или условных людей. Код матери и код ребенка – уникальные номера, присваиваемые реальным лицам для анонимизации данных либо произвольная кодировка для условных людей и гипотетических сценариев. Место контакта с радиоактивно-загрязненной территорией также кодируется. Если мать проживала на территориях с разными уровнями радиоактивного загрязнения (как показано в табл. 1), то для нее (и плода) будет несколько записей с соответствующей динамикой мощности дозы и сценарием поступления.

Динамика мощности дозы в воздухе или вертикальное распределение радионуклидов для каждого места контакта подготавливается на следующем этапе. Описание сценариев поступления также дается в виде дополнительных таблиц на следующем этапе. Если внутреннее облучение отсутствовало, то в графе режим поступления указывается «0».

Есть возможность включить индивидуализирующие поправки к поступлению радионуклидов для расчета доз внутреннего облучения.

Например, если имеется информация о среднем поступлении ^{90}Sr , характерном для взрослых лиц, а начало поступления в конкретном случае пришлось на возраст 5 лет (за 10 лет до беременности), то указанный режим поступления стронция следует скорректировать на возраст в графе «Поправка на возраст для ^{90}Sr ». Можно также индивидуализировать поступление радионуклида (по измерениям ^{90}Sr или ^{137}Cs в продуктах питания или в организме) указав поправочный коэффициент в двух последних колонках базового файла (табл. 1).

После того, как сценарии указаны и базовый файл загружен, кнопкой «Сгенерировать файлы» генерируются шаблоны дополнительных файлов. Для расчета доз внешнего облучения на основе мощностей доз в воздухе про-

грамма сгенерирует шаблон – «kerma.csv», где количество строк должно соответствовать количеству мест контакта, указанных в базовой таблице (табл. 2). Столбцы соответствуют периодам в приближении постоянной мощности дозы для каждого периода.

Если предполагается присутствие короткоживущих гамма-излучателей, то рекомендуется разбиение на периоды не более 10 дней. Динамика заглупления радионуклидов - в файлах с именами типа «n_r_m.csv», где n – номер места контакта; r – название элемента; m – массовое число радионуклида. Например, динамика удельной активности ^{137}Cs на территории под номером 1 должна быть записана в файл «1_Cs_137.csv» (табл. 3).

Таблица 2

Пример заполнения дополнительной таблицы «kerma.csv». Мощность дозы в воздухе вводится в единицах Гр/с

[Table 2]

An example of filling in an additional the kerma.csv table. The dose rate in the air is in the units of Gy/s

Место контакта [Contact place]	01.07.1950	01.08.1950	01.09.1950	01.10.1950	01.11.1950
1	2.5E-10	4.3E-11	1.3E-11	6.3E-12	3.2E-12
2	9.1E-11	5.2E-11	7.4E-12	4.0E-12	2.9E-12

Таблица 3

**Пример таблицы с динамикой вертикального распределения ^{137}Cs в почве («n_Cs_137.csv»).
Удельная активность приводится в единицах Бк/м³**

[Table 3]

**An example of a table with the dynamics of the vertical distribution of ^{137}Cs in soil («n_Cs_137.csv»).
The specific activity is in units of Bq/m³**

Глубина, см [Depth, cm]	10.10.1957	10.11.1957	10.12.1957	10.01.1958	10.02.1958
1	4.80E+05	4.00E+05	1.90E+04	1.00E+04	4.10E+03
5	1.90E+04	1.00E+04	4.10E+03	4.00E+03	1.60E+03

Глубина слоя задается по нижней границе в предположении равномерного распределения внутри слоя. Максимальная глубина – 30 см. Способы разбиения по глубине и количеству слоев не регламентируются. Для короткоживущих ($T_{1/2} < 1$ года) радионуклидов рекомендуется выбирать шаг разбиения не более $(1/3 \cdot T_{1/2})$. Для внутреннего облучения генерируется шаблон поступления для заданного количества сценариев с именами вида «Ri.csv», где рядом с литерой «R» указан номер сценария *i* (например, «R1.csv») (табл. 4).

Таблица 4

Пример входных данных, описывающих режим поступления радионуклидов, Бк/день

[Table 4]

An example of input data describing the mode of intake of radionuclides (Bq/day)

Дата [Date]	^{90}Sr	^{89}Sr	^{137}Cs	^{144}Ce
30.09.1957	103.5	0	6.7	1261.4
01.10.1957	103.5	0	6.7	1261.4

Вычисления запускаются кнопкой «Рассчитать». Программа проверяет корректность заполнения таблиц. Если обнаруживаются ошибки, то в правой нижней панели интерфейса выводится их описание. Трimestровые и суммарные дозы выводятся в файл «dose.csv».

Заключение

Дальнейшее усовершенствование программы будет направлено на: создание возможностей для прогнозирования доз при потенциальных радиационных инцидентах и на совершенствование расчетных методов. Предполагается включение других радионуклидов и сценариев облучения. Так, предполагается добавить сценарий внешнего облучения от радиоактивного облака и внутреннего облучения от изотопов $^{87,88}\text{Kr}$, $^{131,132,133}\text{I}$, ^{134}Cs , ^{91}Sr , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{131m,132}\text{Te}$, поступающих в организм матери перорально и ингаляционно. Планируется уточнение дозовых коэффициенты для изотопов стронция на основе новых вычислительных фантомов скелета плода, полученных методом SPSD [15] с учетом микроархитектуры костей, что может существенно повлиять на оценку доз на ККМ [16]. Программа может быть полезна также в учебных целях при подготовке специалистов в области радиобиологии и дозиметрии.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Шишкина Е.А. – разработка концепции, написание статьи, дизайн исследования;

Шарагин П.А. – вычисления, написание программы, редактирование статьи;

Толстых Е.И. – вычисления, редактирование статьи.

Благодарности

Авторы благодарят Кравцову О.С. за техническую помощь при подготовке библиотек. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

- Shaw P., Duncan A., Vouyouka A., Ozsvath K. Radiation Exposure and Pregnancy // *Journal of Vascular Surgery*. 2011. Vol. 53, № 1. P. 28–34. DOI: 10.1016/j.jvs.2010.05.140.
- Preston D., Cullings H., Suyama A., et al. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors Exposed In Utero or as Young Children // *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*. 2008. Vol. 100, № 6. P. 428–436. DOI: 10.1093/jnci/djn045.
- McCollough C.H., Schueler B.A., Atwell T.D., et al. Radiation exposure and pregnancy: when should we be concerned? // *Radiographics*. 2007. Vol. 27, № 4. P. 909–917; discussion P. 917–918.
- Akleyev A., Deltour I., Krestinina L., et al. Incidence and Mortality of Solid Cancers in People Exposed in Utero to Ionizing Radiation: Pooled Analyses of Two Cohorts from the Southern Urals, Russia // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11, № 8. P. e0160372. DOI: 10.1371/journal.pone.0160372.
- Krestinina L.Yu., Kharyuzov Y.E., Epifanova S.B., et al. Cancer Incidence after in Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents // *Radiation Research*. 2017. Vol. 188, № 3. P. 314–324. DOI: 10.1667/RR14695.1.
- Шишкина Е.А., Волчкова А.Ю., Дегтева М.О., Напье Б. Оценка мощностей доз в воздухе при неравномерном вертикальном распределении γ -излучающих радионуклидов в различных типах почв // *Вопросы радиационной безопасности*. 2016. № 3. С. 42–51.
- Шишкина Е.А., Волчкова А.Ю., Дегтева М.О., Напье Б. Дозовые коэффициенты для конвертации воздушной кермы в значения мощности дозы в органах людей разного возраста при внешнем облучении от ^{137}Cs в почве // *Вопросы радиационной безопасности*. 2018. № 3. С. 36–47.
- Petoussi-Hens N., Satoh D., Schlattl H., et al. Organ doses of the fetus from external environmental exposures // *Radiation Environmental Biophysics*. 2021. Vol. 60, № 1. P. 93–113. DOI: 10.1007/s00411-020-00891-6.
- Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 1. ICRP Publication 56 // *Annals of the ICRP*. 1990. 20 (2).
- The Metabolism of Plutonium and Related Elements. ICRP Publication 48 // *Annals of the ICRP*. 1986. 16 (2–3).
- Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. ICRP Publication 88. *Annals of the ICRP*. 2001. 31 (1–3).
- Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O., et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, № 1. P. 87–127.
- Shagina N.B., Fell T.P., Tolstykh E.I., et al. Strontium biokinetic model for the pregnant woman and fetus: application to Techa River studies // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, № 3. P. 659–676. DOI: 10.1088/0952-4746/35/3/659.
- Maynard M.R., Shagina N.B., Tolstykh E.I., et al. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015. Vol. 54, № 1. P. 47–59. DOI: 10.1007/s00411-014-0570-5.
- Degteva M.O., Tolstykh E.I., Shishkina E.A., et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description // *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16, № 10 P. e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605.
- Шарагин П.А., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Дегтева М.О. Влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку дозы облучения костного мозга от ^{89}Sr // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 4. С. 7–14.

Поступила: 03.12.2024

Шишкина Елена Анатольевна – доктор биологических наук, исполняющий обязанности заведующей биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства; доцент кафедры «Радиобиология» Челябинского государственного университета. **Адрес для переписки:** 454014, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: lena@urcrm.ru

ORCID: 0000-0003-4464-0889

Шарагин Павел Алексеевич – младший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0002-1457-4916

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0002-4958-3214

Для цитирования: Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Толстых Е.И. Компьютерная программа расчета внутриутробных доз от техногенных радионуклидов // *Радиационная гигиена*. 2025. Т. 18, № 1. С. 121–126. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-121-126

Computer program for calculation of in-utero doses from anthropogenic radionuclides

Elena A. Shishkina^{1,2}, Pavel A. Sharagin¹, Evgenia I. Tolstykh¹¹ Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Introduction: A computer program was created to calculate intrauterine radiation doses, "FetusDose", in the frame of the dosimetric support of epidemiological studies conducted for the population of the Ural region. **Summary:** The paper presents the method and describes the principle of organization and functionality of the computer program. The software is designed to calculate trimester and total doses accumulated in the active marrow and extra-skeletal tissues of the fetus when it is irradiated with anthropogenic radionuclides that have accidentally contaminated the environment. When calculating doses, two radiation scenarios are considered: the external one from soil contaminated with gamma-emitters (⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁴⁴Ce/¹⁴⁴Pr/^{144m}Pr, ¹⁰⁶Ru/¹⁰⁶Rh, ⁹¹Y and ¹³⁷Cs/^{137m}Ba) and the internal one from oral intake of radionuclides (⁹⁰Sr/⁹⁰Y, ⁸⁹Sr, ¹³⁷Cs/^{137m}Ba and ¹⁴⁴Ce/¹⁴⁴Pr/^{144m}Pr) into the mother's body with food and water. **Conclusion:** The software can be used both to study the consequences of radiation incidents that have already occurred, and to predict the radiation exposure from potential threats. The program will also be useful for educational purposes in the training of specialists in the field of radiobiology and dosimetry.

Key words: intrauterine radiation, internal radiation, external radiation, fetus, pregnancy, radionuclides.

Authors' personal contribution

Shishkina E.A. – conceptualization, article writing, research design.

Sharagin P.A. – calculations, program writing, editing the article.

Tolstykh E.I. – calculations, editing of the article.

Acknowledgments

The authors thank O.S. Kravtsova for technical assistance in the preparation of software libraries. The authors express the gratitude to the anonymous reviewers for the work done.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

The study was supported by Federal Medical-Biological Agency in the framework of Russian Federal Targeted Program "Provision of nuclear and radiation safety for the period 2016–2020 and for the period up to 2035" R&D.

References

- Shaw P, Duncan A, Vouyouka A, Ozsvath K. Radiation Exposure and Pregnancy. *Journal of Vascular Surgery*. 2011;53(1): 28–34. DOI: 10.1016/j.jvs.2010.05.140.
- Preston D, Cullings H, Suyama A, et al. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors Exposed In Utero or as Young Children. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*. 2008;100(6): 428–436. DOI: 10.1093/jnci/djn045.
- McCullough CH, Schueler BA, Atwell TD, Braun NN, Regner DM, Brown DL, et al. Radiation exposure and pregnancy: when should we be concerned? *Radiographics*. 2007;27(4): 909–917; discussion P. 917–918.
- Akleyev A, Deltour I, Krestina L, et al. Incidence and Mortality of Solid Cancers in People Exposed in Utero to Ionizing Radiation: Pooled Analyses of Two Cohorts from the Southern Urals, Russia. *PLoS ONE*. 2016;11(8): e0160372. DOI: 10.1371/journal.pone.0160372.
- Krestina LY, Kharyuzov YE, Epiphanova SB, et al. Cancer Incidence after in Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents. *Radiation Research*. 2017;188(3): 314–324. DOI: 10.1667/RR14695.1.
- Shishkina EA, Volchkova AY, Degteva MO, Napier BA. Evaluation of dose rates in the air at non-uniform vertical distribution of gamma-emitting radionuclides in different types of soil. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2016;3.: 43–52 (In Russian).
- Shishkina EA, Volchkova AY, Degteva MO, Napier BA. Dose coefficients to convert air kerma into organ dose rate values for people of different ages externally exposed to ¹³⁷Cs in soil. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2018;3: 36–47 (In Russian).
- Petoussi-Hens N, Satoh D, Schlattl H, Zankl M, Spielmann V. Organ doses of the fetus from external environmental exposures. *Radiation Environmental Biophysics*. 2021;60(1): 93–113. DOI: 10.1007/s00411-020-00891-6.
- Maynard MR, Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Fell TP, Bolch WE. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 47–59. DOI: 10.1007/s00411-014-0570-5.
- The Metabolism of Plutonium and Related Elements. ICRP Publication 48. *Annals of the ICRP*. 1986;16(2-3).
- Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. ICRP Publication 88. *Annals of the ICRP*. 2001;31(1-3).
- Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(1): 87–127.
- Shagina NB, Fell TP, Tolstykh EI, Harrison JD, Degteva MO. Strontium biokinetic model for the pregnant woman and fetus: application to Techa River studies. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(3): 659–676. DOI: 10.1088/0952-4746/35/3/659.

Elena A. Shishkina

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

14. Maynard MR, Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Fell TP, Bolch WE. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 47-59. DOI: 10.1007/s00411-014-0570-5.
15. Degteva M.O., Tolstykh E.I., Shishkina E.A., et.al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description. *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16, № 10 P. e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605
16. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI, Degteva MO. The effect of detailing the trabecular structure of bone phantoms on the assessment of the bone marrow dose from 89,90Sr. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 7-14. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-7-14.

Received: December 03, 2024

For correspondence: Elena A. Shishkina – Doctor of Biological Sciences, Acting Head of the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical Biological Agency; Associate Professor of the Department of Radiobiology of Chelyabinsk State University (Vorovsky Str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: lena@urcrm.ru)
ORCID: 0000-0003-4464-0889

Pavel A. Sharagin – Junior Researcher the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-1457-4916

Evgenia I. Tolstykh - Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-4958-3214

For citation: Shishkina E.A., Sharagin P.A., Tolstykh E.I. Computer program for calculation of in-utero doses from anthropogenic radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 121–126. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-121-126

О неполноте обзора подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков

П.С. Микляев^{1,2}, Т.Б. Петрова³, А.А. Цапалов⁴

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

² Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴ Научно-производственное предприятие «Доза», Зеленоград, Москва, Россия

В статье приведены комментарии к статье А.С. Васильева и др. «Обзор подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков». Показано, что в рассматриваемом обзоре не в полной мере отражены некоторые особенности существующего регламента оценки потенциальной радоноопасности территорий, не учтены важные результаты современных исследований в этой области, а также игнорируется единственный в России научно-обоснованный подход к оценке потенциальной радоноопасности участков застройки, внедрённый в практику и прошедший апробацию в индустрии инженерно-экологических изысканий.

Ключевые слова: радон, грунт, земельные участки, плотность потока радона, радиационный контроль, инженерно-экологические изыскания.

В журнале «Радиационная гигиена» № 3 (17) за 2024 год вышел крупный обзор подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков [1]. В обзоре затрагивается вопрос актуализации методических указаний МУ 2.6.1.2398-08¹, обсуждаются результаты научных исследований в этой области, а также действующие нормативные документы – МУ 2.6.1.2398-08 (Роспотребнадзор), МУ 2.6.1.038-2015 (ФМБА России)², СП 502.1325800.2021 (Минстрой)³ и СП 321.1325800.2017 (Минстрой)⁴ регламентирующие проведение оценки потенциальной радоноопасности и проектирование радонозащиты.

На наш взгляд, в своей работе авторы обзора [1] не в полной мере отразили некоторые особенности существующего регламента оценки потенциальной радоноопасности территорий, а также не учли очень важные результаты современных исследований в этой области. В этой связи хотелось бы обратить внимание на следующие моменты.

Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков проводится в составе инженерно-экологических изысканий для строительства, которые включают в себя целый комплекс исследований, в том числе, радиационно-экологические, химические, бактериологические и даже археологические. Проведение инженерно-экологических изысканий регламентируется СП 502.1325800.2021. В п. 5.15.12 данного свода правил указано что «при оценке потенциальной радоноопасности территории и определении исходных данных для проектирования противорадоновой защиты выполняют:

- полевые измерения плотности потока радона с поверхности грунта, согласно МУ 2.6.1.038-2015, п. 5.1, на участке планируемой застройки в соответствии с МУ 2.6.1.2398-08, п. 6.2;
- отбор проб грунта из разнородных литологических слоев в пробуренных на участке скважинах (за исключением

¹ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности: Методические указания (МУ 2.6.1.2398-08). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 27 с. [Radiation control and sanitary-epidemiological assessment of land plots for building construction in terms of radiation safety: Methodological guidelines (MU 2.6.1.2398-08). Moscow: Federal Centre of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2009. 27 p. (In Russ.)]

² Методические указания «Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий» МУ 2.6.1.038. 2016, 36 с. [Methodological guidelines: «Assessment of potential radon hazard of land plots for construction of residential, public and industrial buildings» MU 2.6.1.038. 2016; 36 p. (In Russ.)]

³ Свод правил «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» (СП 502.1325800.2021) Минстрой России. М., 2021. [Code of Regulations «Engineering and Environmental Surveys for Construction. General rules of works» (SP 502.1325800.2021) Ministry of Construction of Russia; Moscow, 2021 (In Russ.)]

⁴ Свод правил «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты» (СП 321.1325800.2017). Минстрой России. М., 2017. [Code of Regulations «Residential and Public Buildings. Design rules for anti-radon protection» (SP 321.1325800.2017). Ministry of Construction of Russia. Moscow; 2017. (In Russ.)]

Микляев Петр Сергеевич

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева

Адрес для переписки: 101000, Россия, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2; E-mail: peterm7@inbox.ru

почвенно-растительного слоя) и проведение лабораторных измерений их радиационно-физических характеристик;

- расчетное определение плотности потока радона в соответствии с МУ 2.6.1.038-2015, п. 7.2 на участке с использованием данных о радиационно-физических характеристиках грунтов в геологическом разрезе;

- выявление аномально высоких потоков радона из грунта по результатам сопоставления измеренных и расчетных значений плотности потока радона;

- оценку соответствия показателей радоноопасности участка установленным требованиям».

Из приведенной цитаты видно, что основной нормативный документ, устанавливающий порядок проведения инженерно-экологических изысканий (СП 502.1325800.2021), предписывает проводить оценку потенциальной радоноопасности территории в соответствии с двумя методическими указаниями: МУ 2.6.1.2398-08 и МУ 2.6.1.038-2015. В МУ 2.6.1.2398-08 регламентируются общие требования к радиационно-гигиеническому обследованию участков, отводимых под застройку, в то время как МУ 2.6.1.038-2015 конкретизируют процедуру оценки потенциальной радоноопасности территорий. В том числе, уточняют перечень ограничений по условиям проведения измерений ППР на участках, а также методику расчетной оценки среднегодового значения ППР из грунтов. Данный весьма важный факт не отражен в обзоре [1].

Утверждение авторов обзора, что МУ 2.6.1.038-2015 могут быть использованы исключительно на территориях, подведомственных ФМБА России, отражает лишь существование некоторой юридической коллизии, но не соответствует реальной ситуации в практике инженерных изысканий. Действительно, вопрос являются ли документы, разрабатываемые ФМБА, применимыми и за пределами полномочий и территорий ФМБА, остается открытым и, возможно, требует привлечения юристов. Однако, очевидно, что разработка и утверждение какого-то особого регламента оценки потенциальной радоноопасности исключительно для территорий, подведомственных ФМБА, было бы абсурдным, т.к. выделение радона из грунтов никак не связано с ведомственной принадлежностью территорий. В самом документе указано, что данные методические указания предназначены для использования организациями любой ведомственной принадлежности и форм собственности. Отметим, что МУ 2.6.1.038-2015 были разработаны с непосредственным участием НИИРГ им. П.В. Рамзаева и утверждены 10 лет назад, но до сих пор возможность применения этого документа на всей территории России без каких-либо ведомственных ограничений ни разу

не ставилась под сомнение ни Роспотребнадзором, ни Минстроем, ни Госэкспертизой ни какими-то ни было другими организациями. Важно, что в 2021 году Минстроем России был утвержден упомянутый выше СП 502.1325800.2021, который не только требует проводить оценку потенциальной радоноопасности в соответствии с МУ 2.6.1.038-2015, но и прямо воспроизводит основные положения этого документа, естественно, без каких-либо территориальных или ведомственных ограничений. Напомним, что Свод правил СП 502.1325800.2021, а значит и прописанные в нем требования, распространяются на всю территорию России. На практике МУ 2.6.1.038-2015 широко применяется в строительной отрасли без каких-либо территориальных ограничений, что видно, например, из анализа изыскательских интернет-форумов⁵, писем Минстроя⁶, протоколов Технического комитета по стандартизации Росстандарта⁷ и т.п. Таким образом, мы действительно имеем некоторую юридическую коллизию, которую, возможно, должны разъяснить юристы с учетом требований СП 502.1325800.2021, сложившейся системы нормативно-методических документов и практики работ в области оценки потенциальной радоноопасности территорий. Однако, заявление авторов [1], что МУ 2.6.1.038-2015 «предназначены... для применения исключительно на обслуживаемых ФМБА России территориях подведомственными организациями» [1], явно не соответствует сложившейся практике и не может служить поводом для исключения данного документа из рассмотрения в обзоре подходов к оценке радоноопасности земельных участков.

Утверждение авторов обзора, что описанный в МУ 2.6.1.038-2015 порядок оценки радоноопасности земельных участков вызывает серьезные трудности у организаций, занимающихся инженерными изысканиями, и приводит к значительному увеличению комплекса изыскательских работ, также является ошибочным. Требования к порядку выполнения работ и объему изысканий, включая оценку радоноопасности в соответствии с МУ 2.6.1.038-2015, как указывалось выше, устанавливает СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические исследования в настоящее время проводятся как правило, в комплексе с другими видами инженерных изысканий, включая инженерно-геологические. Работы выполняются специализированными изыскательскими организациями в полной мере укомплектованными квалифицированными кадрами и всем необходимым оборудованием. Комплекс выполняемых работ в любом случае включает в себя и бурение скважин, и отбор проб грунта, и их лабораторный анализ. В этой связи, порядок оценки радоноопасности, описанный

⁵ Форум для экологов S-Интергал. URL: <https://forum.integral.ru/viewtopic.php?t=23930> (Дата обращения: 01.11.2024) [Ecologists Forum S-Integral. Available from: <https://forum.integral.ru/viewtopic.php?t=23930> (Accessed: 01.11.2024) (In Russ.)]

⁶ Письмо Минстроя России от 25.09.2024 № 56157-СМ/00 О применении требований СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_488896/ (Дата обращения: 01.11.2024) [Letter of the Ministry of Construction of Russia from 25.09.2024 № 56157-СМ/00 On application of the requirements of SP 502.1325800.2021 «Engineering and environmental surveys for construction. General rules of works». Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_488896/ (Accessed: 01.11.2024) (In Russ.)]

⁷ Протокол совещания ТК-506 «Инженерные изыскания и геотехника» по рассмотрению предложений по внесению изменений в СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» от 28.03.2024. URL: <https://igiis.ru/wordpress/wp-content/uploads/2024/04/23-TK-506-ot-28.03.2024-s-pril-1-2-SP-502.pdf> (Дата обращения: 01.11.2024) [Minutes of the meeting of TC-506 «Engineering Surveys and Geotechnics» on consideration of proposals for amendments to SP 502.1325800.2021 «Engineering and Environmental Surveys for Construction. General rules of works» dated 28 March 2024. Available from: <https://igiis.ru/wordpress/wp-content/uploads/2024/04/23-TK-506-ot-28.03.2024-s-pril-1-2-SP-502.pdf> (Accessed: 01.11.2024) (In Russ.)]

в МУ 2.6.1.038-2015 и закрепленный в СП 502.1325800.2021, не может вызывать существенные затруднения у профессионалов. Важно отметить, что разработчики МУ 2.6.1.038-2015 не получили до сих пор ни одного нарекания со стороны представителей изыскательского сообщества.

Утверждение авторов [1], что проведение буровых, лабораторных и аналитических работ оправдано только если результаты измерений ППР в контрольных точках превышают допустимый уровень, и только для проектирования противорадоновой защиты зданий в соответствии с СП 321.1325800.2017, является ошибочной (либо избирательной?) трактовкой положений данного свода правил. В действительности СП 321.1325800.2017 устанавливает целый ряд признаков радоноопасности, включая повышенные значения таких параметров как ППР из грунта, радонового потенциала грунта в основании здания, ОА радона в почвенном воздухе, ОА радона в близлежащих зданиях, содержания радия-226 в геологическом разрезе и др. (п. 5.2). Наличие или отсутствие на участке признаков потенциальной радоноопасности предписывается определять в соответствии с МУ 2.6.1.038-2015 (п. 5.4), то есть, в том числе, на основе отбора и анализа проб из скважин. Расчеты противорадоновой защиты следует выполнять при наличии хотя бы одного из перечисленных признаков, а не только превышений по ППР (п. 5.5). Кроме того, как подтверждают многочисленные исследования, на которые также ссылаются авторы [1], результаты измерений плотности потока радона в контрольных точках, полученные на одном и том же участке в разные моменты времени, могут значительно различаться из-за существенных и закономерных вариаций ППР во времени, обусловленных, главным образом, влиянием колебаний влажности (проницаемости) грунтов и метеорологических факторов. В итоге, средняя по площади ППР на одном и том же участке в разные моменты времени, может быть, как ниже, так и выше допустимого уровня. Кроме того, достаточно распространены случаи, когда на радоноопасных участках верхний слой грунта, обладающий низкой проницаемостью, может экранировать поток радона из более глубоких слоев. Все перечисленные выше факторы авторы [1] рассматривают в своем обзоре как весьма значимые, тем самым подтверждая, что участок может являться радоноопасным даже при значениях ППР ниже допустимого уровня. Именно поэтому необходимо проведение буровых работ с определением радиационно-физических свойств грунтов независимо от результатов прямых измерений ППР на участке.

Наконец, следует отметить, что упомянутые выше МУ 2.6.1.038-2015 были разработаны на основе многолетних научных исследований и практического опыта оценки потенциальной радоноопасности территорий. Так, в основе документа лежит обобщение значительного массива данных по результатам инженерно-экологических изысканий на территории Москвы, проведенных с участием разработчиков в период с 1998 по 2012 год (около 4000 участков строительства) [2]. Кроме того, силами крупной научной коллаборации, включающей такие институты, как НТЦ РХБГ (Москва), ИГЭ РАН (Москва), МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва), НИИСФ РААСН (Москва), НИИРГ им. П.В. Рамзаева (Санкт-Петербург), ПГНИИК (Пятигорск), ИГФ УрО РАН (Екатеринбург), филиал Урангео «Сосновгеология» (Иркутск) и другие организации, под общим руководством А.М. Маренного (НТЦ РХБГ ФМБА России), была

выполнена долгосрочная программа исследований поведения радона в геологической среде. Исследования, о которых идет речь, выполнялись в период с 2010 по 2015 гг. в рамках ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» и включали долгосрочный мониторинг целого комплекса радиационных параметров на пяти экспериментальных площадках, расположенных в разных регионах России (Москве, Рязанской области, Екатеринбурге, Пятигорске, Иркутской области). На каждой площадке в течение 1,0-2,5 лет проводились еженедельные измерения. Комплекс измеряемых параметров включал ППР с поверхности грунта, объемную активность радона в грунтовом воздухе на глубинах от 0,2 до 5–10 м, МАЭД гамма-излучения, влажность почвы, температуру почвы и грунта, уровень грунтовых вод, а также метеопараметры. В рамках программы проводилось детальное изучение радиационно-физических свойств грунтов на каждой площадке и математическое моделирование переноса радона с верификацией расчетных моделей на основе полученных фактических данных. В результате был разработан усовершенствованный подход к оценке потенциальной радоноопасности, суть которого заключается в дополнении результатов прямых измерений ППР с поверхности грунта расчетными значениями, полученными на основе простой, но надежной формулы с использованием радиационно-физических свойств грунта (прежде всего, удельной активности радия-226) до глубины 2 м ниже отметки заложения фундамента. По масштабу и значимости полученных результатов данное исследование не имеет аналогов не только в России, но и в мире. Результаты исследований были опубликованы в большой серии статей в журнале АНРИ с 2014 по 2017 год, а затем обобщены в монографии [3]. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что расчетные значения ППР в большинстве случаев более корректно характеризуют потенциальную радоноопасность территории, чем напрямую измеренные на поверхности грунта или на подошве котлована, т.к. последние подвержены существенным временным вариациям.

Описанный выше подход был положен в основу МУ 2.6.1.038-2015, а в последующем использован в СП 502.1325800.2021 и СП 321.1325800.2017. Однако при чтении обзора [1] создается впечатление, что упомянутой выше крупной исследовательской программы, как и усовершенствованного подхода к оценке радоноопасности, просто не существует, так как авторы обзора об этом исследовании ни разу не упоминают и на монографию [3] не ссылаются. Непонятно, на каком основании авторы [1] не считают эти результаты достаточно значимыми. На наш взгляд, это делает рассматриваемый обзор неполным, если не сказать, предвзятым.

Заключение

Усовершенствование алгоритма оценки потенциальной радоноопасности земельных участков, а также актуализация МУ 2.6.1.2398-08 является, несомненно, очень важной задачей, т.к. данный документ давно устарел. Хочется, однако, верить, что актуализация будет проводиться действительно с учётом новых знаний и достижений в области исследований переноса радона в геологической среде, а также современных требований нормативных документов строительной отрасли. В этой связи вызывает тревогу игнорирование коллегами из ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева

действующих нормативно-методических документов в области инженерных изысканий для строительства, а также результатов крупных научных исследований, на основе которых эти документы были разработаны (кстати, с участием НИИРГ им. П.В. Рамзаева). Вызывает недоумение тот факт, что в статье под названием «Обзор подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков» полностью игнорируется единственный в России научно-обоснованный подход к оценке потенциальной радоноопасности участков застройки, внедрённый в практику в виде официально утвержденных нормативно-методических документов (МУ 2.6.1.038-2015, СП 502.1325800.2021, СП 321.1325800.2017) и прошедший апробацию в индустрии инженерно-экологических изысканий.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья не имела спонсорской поддержки.

Литература

1. Васильев А.С., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Сапрыкин К.А. Обзор подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 142–153. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-142-153.
2. Микляев П.С., Макаров В.И., Дорожко А.Л. и др. Радоновое поле Москвы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2013. № 2, С. 172–187.
3. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.

Поступила: 05.11.2024

Микляев Петр Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор Российской академии наук, заместитель директора по научной работе Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук; старший научный сотрудник, Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 101000, Россия, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2; E-mail: peterm7@inbox.ru

ORCID: 0000-0003-1821-6275

Петрова Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник химического факультета Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Цапалов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, консультант в области исследований и регулирования радона Научно-производственное предприятие «Доза», Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-5875-381X

Для цитирования: Микляев П.С., Петрова Т.Б., Цапалов А.А. О неполноте обзора подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 127–131. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-127-131

About the incompleteness of the review of approaches to assessing the potential radon hazard of land sites

Petr S. Miklyaev^{1,2}, Tatiana B. Petrova³, Andrey A. Tsapalov⁴

¹ Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ Scientific Production Company “Doza”, Zelenograd, Moscow, Russia

The article presents comments on the manuscript by A.S. Vasiliev et al. “A review of approaches to assessment of potential radon hazard of land plots”. The manuscript does not fully reflect some features of the existing regulations for assessment of potential radon hazard of territories. In addition, important results of modern research in the field have not been considered, and single science-based approach in Russia to assess the potential radon hazard of building sites, which has been implemented in practice and tested in the industry of engineering and environmental surveys, is ignored.

Key words: radon, soil, land sites, radon exhalation, radiation control, engineering and environmental surveys.

Petr S. Miklyaev

Sergeev Institute of Environmental Geoscience

Address for correspondence: Ulansky Lane, 13, p. 2, Moscow, 101000, Russia; E-mail: peterm7@inbox.ru

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interest.

Sources of funding

The article had no sponsorship.

2. Miklyaev PS, Makarov VI, Dorozhko AL, Petrova TB, Marennny MA, Marennny AM, et al. Radon field of Moscow. *Geoekologiya = Geoecology*. 2013(2): 172–187 (In Russian).
3. Marennny AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB. Patterns of formation of the radon field in the geological environment. Moscow: Pero; 2016. 394 p. (In Russian).

References

Received: November 05, 2024

1. Vasilyev AS, Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Saprykin KA. A review of approaches to assessment of potential radon hazard of land plots. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 142–153. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-142-153.

For correspondence: Petr S. Miklyaev – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work, Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences; Major Researcher, Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical Biological Agency (Ulansky Lane, 13, p. 2, Moscow, 101000, Russia; E-mail: peterm7@inbox.ru)
ORCID: 0000-0003-1821-6275

Tatiana B. Petrova – Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Andrey A. Tsapalov – Candidate of Engineering Sciences, Experienced Researcher, Consultant in the Field of Radon Research and Regulation, Scientific Production Company «Doza», Zelenograd, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-5875-381X

For citation: Miklyaev P.S., Petrova T.B., Tsapalov A.A. About the incompleteness of the review of approaches to assessing the potential radon hazard of land sites. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 127–131. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-127-131

К вопросу монетарной оценки потенциального ущерба, связанного с воздействием ионизирующего излучения на население Российской Федерации

А.В. Водоватов^{1,2}, Л.В. Репин¹, А.М. Библин¹, Д.В. Кононенко¹, Г.А. Горский^{1,3}

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

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

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

Введение: Оценка потенциального ущерба, связанного с воздействием ионизирующего излучения на человека, является одним из основных этапов принятия управленческих решений в контексте обоснования расходов на практическую реализацию требований по обеспечению радиационной безопасности. Наиболее универсальной является оценка ущерба в денежных единицах. Несмотря на то, что детальные расчеты такого ущерба являются специфическими для каждого сценария использования источников ионизирующего излучения, для грубой консервативной монетарной оценки возможно использовать методику, представленную в Нормативах радиационной безопасности НРБ-99/2009. Целью данной работы являлась оценка потенциального ущерба, связанного с радиационным воздействием на человека в Российской Федерации, в монетарном выражении. Краткое содержание: В данной работе описаны ограничения применимости данной методики и выполнена оценка ущерба для различных источников ионизирующего излучения. Заключение: Результаты работы можно использовать для обоснования расходов на организацию мероприятий по обеспечению радиационной защиты в Российской Федерации.

Ключевые слова: радиационный ущерб, источники ионизирующего излучения, коллективная доза, монетарная оценка, Нормы радиационной безопасности.

Issues of monetary evaluation of potential radiation detriment of the population of the Russian Federation

Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Leonid V. Repin¹, Artem M. Biblin¹, Dmitry V. Kononenko¹, Grigory A. Gorsky^{1,3}

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

Introduction: Assessment of the potential radiation detriment is one of the key elements in decision-making processes within the context of the practical implementation of radiation safety requirements. In the absence of more suitable indicators, the most universal approach is based on the evaluation of detriment in monetary terms. Although detailed calculations of such detriment are specific to each scenario involving the use of sources of ionizing radiation, a rough conservative monetary evaluation can be performed using the methodology outlined in the Norms of the Radiation Safety NRB-99/2009. The objective of this study was to assess the potential detriment associated with radiation exposure in the Russian Federation, expressed in monetary units. Summary: The work describes the limitations of this methodology and provides an evaluation of detriment for various sources of ionizing radiation. Conclusion: The results of this study can be used to justify and estimate the effectiveness of radiation protection measures in the Russian Federation.

Key words: radiation detriment, sources of ionizing radiation, collective dose, monetary evaluation, Norms of the Radiation Safety.

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

Aleksandr V. Vodovатов

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

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

Введение

Практическая реализация принципов обоснования и оптимизации радиационной защиты требует решения задачи сопоставления пользы и вреда, связанных с изменением ситуации облучения [1, 2]. При этом сопоставление пользы и вреда должно осуществляться в соизмеримых единицах, а наиболее универсальной из таких единиц является стоимостное выражение пользы и «вреда» (затрат или издержек, вызванных изменением ситуации облучения) [3, 4]. Монетарная оценка вреда, связанного с использованием ионизирующего излучения (ИИ) в управляемых условиях, является комплексной задачей и может включать в себя множество факторов, не связанных напрямую с воздействием ИИ на человека. Например, при оценке полного ущерба, связанного с медицинским облучением, к числу издержек можно отнести не только стоимостное выражение ущерба для здоровья пациентов, связанного с воздействием ИИ при проведении исследования, но и издержки, связанные со снижением диагностической или терапевтической эффективности процедуры, возможным развитием побочных эффектов от процедуры и/или радиационных аварий и происшествий, связанных с переоблучением пациентов и прочее [3–5].

Масштаб и сложность задачи оценки пользы и вреда при медицинском облучении пациентов заключаются еще и в различном распределении пользы и вреда во времени. Потенциальная польза от использования ИИ реализуется (при удачном стечении обстоятельств) либо непосредственно после проведения исследования (благодаря быстрому получению необходимой диагностической информации), либо спустя некоторое время (благодаря своевременной постановке диагноза, эффективному лечению и увеличению продолжительности здоровой жизни пациента). Возможный вред от медицинского облучения может реализоваться спустя годы и даже десятилетия¹. Аналогичные рассуждения применимы и к иным ситуациям и сценариям облучения [6, 7]. Тем не менее, даже консервативная монетарная оценка вреда (ущерба) позволит обеспечить необходимую базу для решения практических задач обеспечения радиационной защиты населения.

Цель исследования – оценка потенциального ущерба, связанного с радиационным воздействием на человека в Российской Федерации, в монетарных величинах.

В СанПиН 2.6.1.2523-09² предлагается следующий подход к монетарной оценке потенциального ущерба, связанного с радиационным воздействием на человека: «Для обоснования расходов на радиационную защиту при реализации принципа оптимизации принимается, что облучение в коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере примерно 1 чел.-года жизни населения. Величина денежного

Introduction

The practical implementation of the principles of justification and optimization in radiation protection requires addressing the challenge of comparing the benefits and detriment associated with changes in exposure situations [1, 2]. Comparison of benefits and detriment must be conducted in commensurate units, with the most universal of these being the monetary expression of benefits and "detriment" (costs or losses induced by changes in the exposure situation) [3, 4]. The monetary valuation of detriment associated with the use of ionizing radiation (IR) in controlled situations is a complex task that may encompass a wide range of factors not directly related to the impact of IR on humans. For instance, when assessing the total detriment associated with medical exposure, the costs may include not only the monetary valuation of reduction in patient health due to IR exposure during procedures, but also expenses related to reduced diagnostic or therapeutic effectiveness of the procedure, potential development of side effects from the procedure, and/or radiation accidents and incidents resulting in patient overexposure [3–5].

The scale and complexity of the task of assessing benefits and detriment in the context of medical exposure of patients are further compounded by the differing temporal distribution of benefits and detriment. The potential benefits from the use of IR are realized (under favorable circumstances) either immediately following the procedure (due to the rapid acquisition of necessary diagnostic information) or after some time (due to timely diagnosis, effective treatment, and an increase in the patient healthy lifespan). In contrast, the potential harm from medical exposure may manifest years or even decades later¹. Similar considerations apply to other exposure situations and scenarios [6, 7]. Nevertheless, even a conservative monetary valuation of harm (detriment) can provide the necessary basis for addressing practical challenges in ensuring the radiation protection of the population.

The objective of this study was to evaluate the potential detriment associated with radiation exposure to humans in the Russian Federation, expressed in monetary terms.

In SanPiN 2.6.1.2523-09 ("Norms of the Radiation Safety (NRB-99/2009)"),² the following approach to the monetary estimation of potential detriment associated with radiation exposure to humans is proposed: "To justify expenditures on radiation protection in the implementation of the optimization principle, it is assumed that exposure resulting in a collective effective dose of 1 person-Sv leads to potential detriment equivalent to the loss of approximately 1 person-year of population life. The monetary equivalent of the loss of 1 person-year of life is established by separate federal-level documents and set at no less than 1 annual per capita national income."

¹В рамках настоящей статьи не рассматриваются издержки, относящиеся к периоду, предшествующему периоду облучения. К таким издержкам можно отнести расходы и риски, связанные с разработкой, производством, логистикой, эксплуатацией и обслуживанием оборудования, являющегося источником ИИ, а также иные издержки, не относящиеся непосредственно к ситуации облучения человека. [Within the scope of this article, costs pertaining to the period prior to the exposure period are not considered. Such costs may include expenses and risks associated with the development, production, logistics, operation, and maintenance of equipment serving as a source of IR, as well as other costs not directly related to the situation of human exposure (In Russ.).]

²Нормы 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.).]

эквивалента потери 1 чел.-года жизни устанавливается отдельными документами федерального уровня в размере не менее 1 годового душевого национального дохода».

Указанные значения выведены из следующих соображений:

1) риск развития стохастических эффектов облучения принимается равным 0,057 на 1 чел.-Зв коллективной дозы в соответствии с п. 2.3 НРБ-99/2009;

2) средняя потеря лет жизни, связанная с возникновением онкологического заболевания, в соответствии с Публикацией 103 МКРЗ [1] принята равной 15 годам;

3) облучение в коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв приводит к потере приблизительно $0,057 \cdot 15 = 0,855$ чел.-года жизни;

4) доля несмертельных заболеваний в общем радиационном ущербе составляет порядка 10 %, что позволяет округлить потери до 1 чел.-года жизни.

Указанные соображения позволяют примерно оценить нижнюю границу возможных не прямых экономических потерь на уровне 1 среднегодовой величины валового внутреннего продукта на душу населения, «непроизведенного вследствие потери рабочего времени (дней и лет) заболевшим» [8] или непроизведенного вследствие необходимости ухода за лицом, нуждающимся в таком уходе (при заболевании ребенка, пенсионера или иного лица). Важно отметить, что полученная таким образом оценка возможного ущерба рассчитана лишь на решение задачи обоснования расходов на обеспечение радиационной защиты. Не следует воспринимать данную оценку в качестве прогноза реального экономического ущерба [3, 4]. Тем более, не следует рассматривать указанную величину в качестве оценки ущерба в ситуациях, связанных с радиационными авариями, поскольку оценка нерадиационных последствий таких аварий является отдельной сложной задачей, при решении которой непосредственно радиационный вред для здоровья зачастую не играет значимой роли в суммарном ущербе.

Рассматривая экономический ущерб, связанный непосредственно с воздействием ИИ на здоровье человека в различных ситуациях облучения, следует различать управляемую и неуправляемую составляющие ущерба (суммарного риска для здоровья). К неуправляемой составляющей относятся источники ИИ, вклад которых в коллективную дозу облучения принципиально не может быть снижен разумными способами (например, облучение за счет ^{40}K , содержащегося в теле человека, или за счет космического излучения). Неуправляемые риски следует воспринимать не как «риски», но как условия жизни. В противоположность им к управляемой составляющей ущерба относятся источники ИИ, вклад которых в коллективную дозу принципиально может корректироваться. Однако, рассматривая управляемые источники ИИ, следует разделять связанные с такими источниками риски на предотвратимые и предотвратимые. В отличие от управляемых и неуправляемых, граница между предотвратимыми и предотвратимыми рисками менее строга и может определяться исходя из целесообразности вмешательства. Примером, демонстрирующим нестрогость границы, может служить ситуация природного облучения. По данным функционирующего в Российской Федерации в рамках Единой государственной системы контроля и учета доз облучения граждан (ЕСКИД) более 20 лет Федерального банка данных доз облучения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ)³, среднерегиональные дозы облучения населения за счет природных источников (за вычетом неуправляемого компонента, составляющего в сред-

These values are derived from the following considerations:

1. The risk of developing stochastic effects from radiation exposure is taken as 0.057 per 1 person-Sv of collective dose, in accordance with Clause 2.3 of NRB-99/2009;

2. The average loss of years of life associated with the onset of an oncological disease is assumed to be 15 years, in accordance with ICRP Publication 103 [1];

3. Exposure resulting in a collective effective dose of 1 person-Sv leads to a loss of approximately $0.057 \cdot 15 = 0.855$ person-year of life;

4. The proportion of non-fatal diseases in the total radiation-induced detriment is approximately 10 %, which allows rounding the loss to 1 person-year of life.

These considerations allow for an approximate estimation of the lower bound of potential indirect economic losses at the level of 1 average annual per capita gross domestic product, "not produced due to the loss of working time (days and years) by the affected individual" [8] or not produced due to the need to care for a person requiring such care (e.g., in the case of illness of a child, pensioner, or other individual). It is important to note that the estimate of potential detriment derived in this manner is intended solely for the purpose of justifying expenditures on radiation protection measures. This estimate should not be interpreted as a prediction of actual economic detriment [3, 4]. Furthermore, it should not be regarded as an assessment of detriment in situations involving radiation accidents, as the evaluation of non-radiation consequences of such accidents constitutes a separate and complex task, in which direct radiation harm to health often does not play a significant role in the total detriment.

When considering the economic detriment directly associated with the impact of IR on human health across various exposure situations, it is necessary to distinguish between the manageable and unmanageable components of detriment (total health risk). The unmanageable component includes sources of IR whose contribution to the collective dose cannot, in principle, be reasonably reduced (e.g., exposure due to ^{40}K present in the human body or due to cosmic radiation). Unmanageable risks should be perceived not as "risks" but as inherent conditions of life. In contrast, the manageable component of detriment encompasses sources of IR whose contribution to the collective dose can, in principle, be adjusted. However, when examining manageable IR sources, it is important to further differentiate the associated risks into preventable and unpreventable categories. Unlike the distinction between manageable and unmanageable components, the boundary between preventable and unpreventable risks is less rigid and may be determined based on the feasibility of intervention. An example illustrating the flexibility of this boundary is the case of exposure to natural background radiation. According to data from the Federal Dose Data Bank on Exposure from Natural and Technogenically Altered Radiation Background, which has been operating in the Russian Federation for over 20 years as part of the Unified System for Monitoring and Recording Individual Radiation Doses of Citizens (ESKID)³, the average regional doses to the population from natural sources (excluding the unmanageable component, which averages about 15 %) vary widely—from slightly above 2 to nearly 9 mSv/year. At the same time,

³Постановление Правительства Российской Федерации от 16.06.97 № 718 «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, "On the Procedure for Establishing the Unified System for Monitoring and Recording Individual Radiation Doses of Citizens "(In Russ.)]

нем около 15 %) варьируются в достаточно широких пределах – от чуть более 2 до почти 9 мЗв/год. При этом классификация уровней доз установлена в отечественных санитарных правилах, по сути, экспертно (например, после накопления 10-летнего массива данных о реальных дозах облучения первоначальные границы доз приемлемого, повышенного и высокого природного облучения населения, установленные в ОСПОРБ-99⁴, были пересмотрены в ОСПОРБ 99/2010⁵ в сторону увеличения в два раза). Соответственно, предотвратимыми полагаются риски, снижение которых до «приемлемого» уровня в принципе рассматривается в рамках системы радиационной защиты [6, 7].

Для прогнозной монетарной оценки потенциального ущерба населению Российской Федерации за счет различных видов источников ИИ были использованы данные о структуре коллективной дозы, полученные по результатам радиационно-гигиенической паспортизации за 2023 год⁶. Для расчетов использовали величину душевого валового национального дохода в Российской Федерации, принятую за 1,1 млн рублей⁷. Результаты расчетов представлены в таблице.

the classification of dose levels in national regulations has been established largely on an expert basis (e.g., after accumulating a 10-year dataset of actual exposure doses, the initial thresholds for acceptable, elevated, and high levels of public exposure to natural background radiation set in OSPORB-99⁴ were revised upward by a factor of two in OSPORB-99/2010⁵). Accordingly, risks are considered preventable if their reduction to an "acceptable" level is, in principle, addressed within the framework of the radiation protection system [6, 7].

For the predictive monetary estimation of potential detriment to the population of the Russian Federation caused by various types of IR sources, data on the structure of the collective dose, obtained from the results of radiation-hygienic certification for 2023⁶, were utilized. For the calculations, the per capita gross national income in the Russian Federation was adopted as 1.1 million RUB⁷. The results of the calculations are presented in the table.

Таблица

Структура коллективной дозы населения Российской Федерации и связанного с ней потенциального ущерба в различных единицах

[Table

Structure of the collective dose of the population of the Russian Federation and its associated potential detriment in various units]

Виды облучения населения Российской Федерации [Type of radiation exposure in the Russian Federation]	Коллективная эффективная доза, чел.-Зв/год [Collective effective dose (person-Sv/year)]	Вклад, % [Contribution (%)]	Средняя эффективная доза на жителя, мЗв/год [Average effective dose per resident (mSv/year)]	Натуральная оценка годового ущерба, количество смертельных и несмертельных случаев заболеваний [Natural annual detriment estimate (Number of fatal and non-fatal cases)]	Монетарная оценка годового ущерба, млн руб. [Monetary annual detriment estimate (Million RUB)]	Управляемость источником [Source controllability]	Потенциал снижения [Reduction potential]
Деятельность предприятий, использующих источники ИИ. В том числе: [Activities of enterprises using ionizing radiation sources Including:]	347,1	0,1	0,002	20	381,81	Да [Yes]	Да [Yes]
– персонала [– Staff]	329,1	0,1	0,002	19	362,01	Да [Yes]	Да [Yes]
– населения, проживающего в зонах наблюдения [– Population residing in observation zones]	18	0,003	–	1	19,8	Да [Yes]	Нет [No]

⁴Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99): Санитарные правила СП 2.6.1.799-99. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 27.12.1999. [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB-99). Sanitary rules SP 2.6.1.799-99. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation 27.12.1999. Expired. (In Russ.)]

⁵Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18115). (In Russ.)]

⁶Постановление Правительства Российской Федерации № 93 от 28.01.97 г. «О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 93 of January 28, 1997, "On the Procedure for Developing Radiation-Hygienic Passports of Organizations and Territories" (In Russ.)]

⁷Доступно по ссылке: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/WVP_na_dushu_s1995-2023.xls (Дата обращения: 01.02.2025) [Available from: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/WVP_na_dushu_s1995-2023.xls (Accessed February 01.02.2025) (In Russ.)]

Виды облучения населения Российской Федерации [Type of radiation exposure i in the Russian Federation]	Коллективная эффективная доза, чел.-Зв/год [Collective effective dose (person-Sv/year)]	Вклад, % [Contribution (%)]	Средняя эффективная доза на жителя, мЗв/год [Average effective dose per resident (mSv/year)]	Натуральная оценка годового ущерба, количество смертельных и несмертельных случаев заболеваний [Natural annual detriment estimate (Number of fatal and non-fatal cases)]	Монетарная оценка годового ущерба, млн руб. [Monetary annual detriment estimate (Million RUB)]	Управляемость источником [Source controllability]	Потенциал снижения [Reduction potential]
Техногенно измененный радиационный фон. В том числе: [Technogenically altered radiation background Including:]	956,3	0,2	0,01	55	1,052 • 10 ³	Нет [No]	Нет [No]
– за счет глобальных выпадений [– Due to global fallout]	740,1	0,1	0,01	42	814,11	Нет [No]	Нет [No]
– за счет радиационных ава- рий прошлых лет [– Due to past radiation accidents]	216,2	0,0	–	12	237,82	Нет [No]	Нет [No]
Природные источники. В том числе: [Natural sources Including:]	465983	73,4	3,15	26561	5,126 • 10 ⁵	Да [Yes]	Да [Yes]
– от радона [– From radon]	259341	40,8	1,75	14782	2,853 • 10 ⁵	Да [Yes]	Да [Yes]
– от внешнего терригенного гамма-излучения [– From external terrestrial gamma radiation]	101633	16,0	0,69	5793	1,118 • 10 ⁵	Да [Yes]	Нет [No]
– от космического излучения [– From cosmic radiation]	59207	9,3	0,4	3375	6,513 • 10 ⁴	Нет [No]	Нет [No]
– от пищи и питьевой воды [– From food and drinking water]	20640	3,3	0,14	1176	2,27 • 10 ⁴	Да [Yes]	Нет [No]
– от содержащегося в организме ⁴⁰ K [– From naturally occurring ⁴⁰ K in the body]	25163	4,0	0,17	1434	2,768 • 10 ⁴	Нет [No]	Нет [No]
Медицинские диагностические исследования [Medical diagnostic examinations]	167627	26,4	1,13	9555	1,844 • 10 ⁵	Да [Yes]	Да [Yes]
Радиационные аварии и происшествия в отчетном году [Radiation accidents and incidents in the reporting year]	–	–	–	–	–	Да [Yes]	Да [Yes]

Виды облучения населения Российской Федерации [Type of radiation exposure i in the Russian Federation]	Коллективная эффективная доза, чел.-Зв/год [Collective effective dose (person-Sv/year)]	Вклад, % [Contribution (%)]	Средняя эффективная доза на жителя, мЗв/год [Average effective dose per resident (mSv/year)]	Натуральная оценка годового ущерба, количество смертельных и не смертельных случаев заболеваний [Natural annual detriment estimate (Number of fatal and non-fatal cases)]	Монетарная оценка годового ущерба, млн руб. [Monetary annual detriment estimate (Million RUB)]	Управляемость источником [Source controllability]	Потенциал снижения [Reduction potential]
Всего по Российской Федерации [Total for the Russian Federation]	634913	–	4,29	36190	6,984 • 10 ⁵	Да [Yes]	Да [Yes]
Реально снижаемая коллективная доза, чел.-Зв [Effectively reducible collective dose (person-Sv)]	427315,1	–	–	24357	4,7 • 10 ⁵	–	–

Результаты, представленные в таблице, позволяют сделать следующие выводы:

- коллективная доза населения Российской Федерации от всех источников ИИ составляет около 630 тыс. чел.-Зв, что соответствует примерно 700 млрд руб. потенциального экономического ущерба;

- значительный вклад в коллективную дозу и, как следствие, в потенциальный экономический ущерб вносят источники ИИ, управление которыми на текущем уровне развития технологий принципиально невозможно (например, облучение за счет космического излучения или ⁴⁰K, поступающего в организм с пищей и водой), или такое управление является малоэффективным (например, облучение за счет глобальных выпадений или проживание на радиоактивно загрязненных территориях);

- для ряда управляемых источников ИИ отсутствует реальный потенциал для значимого снижения коллективной дозы (несмотря на то, что снижение доз для отдельных индивидуумов вполне реализуемо). К таким категориям можно отнести, например, внешнее терригенное гамма-излучение или внутреннее облучение за счет радионуклидов, содержащихся в пищевых продуктах и питьевой воде (прежде всего, природных) [6, 7].

Таким образом, реальное значение потенциально снижаемой коллективной дозы будет значительно ниже. За вычетом коллективной дозы от источников, управление которыми невозможно, и/или для которых потенциальное снижение коллективной дозы за счет различных защитных мероприятий является пренебрежимо малым, реально снижаемая коллективная доза населения Российской Федерации оценивается примерно в 430 тыс. чел.-Зв, в основном от радона и медицинских источников ИИ. Этой коллективной дозе соответствует потенциальный экономический ущерб в 470 млрд руб.

Как уже было отмечено выше, данный ущерб включает в себя исключительно не прямые экономические потери за счет временного или постоянного исключения людей из производства валового национального продукта. Учет прямых потерь (за счет затрат на диагностику и лечение патологических состояний, вызванных воздействием ИИ) в данной ра-

The results presented in the table allow for the following conclusions:

- The collective dose to the population of the Russian Federation from all sources of IR amounts to approximately 630,000 person-Sv, corresponding to roughly 700 billion RUB in potential economic detriment;

- A significant contribution to the collective dose, and consequently to the potential economic detriment, is due to IR sources whose management, at the current level of technological development, is fundamentally impossible (e.g., exposure due to cosmic radiation or ⁴⁰K ingested with food and water) or is of limited effectiveness (e.g., exposure due to global fallout or residence in radioactively contaminated territories);

- For a number of manageable sources of IR, there is no real potential for significantly reducing the collective dose (despite the fact that dose reduction for individual persons is quite feasible). Such categories include, for example, external terrestrial gamma radiation or internal exposure due to radionuclides present in food products and drinking water (primarily of natural origin) [6, 7].

Hence, the actual value of the potentially reducible collective dose will be significantly lower. Excluding the collective dose from sources that cannot be managed and/or for which the potential reduction in collective dose through various protective measures is negligibly small, the realistically reducible collective dose to the population of the Russian Federation is estimated at approximately 430,000 person-Sv, primarily from radon and medical sources of ionizing radiation (IR). This collective dose corresponds to a potential economic detriment of 470 billion RUB.

As noted earlier, this detriment encompasses solely indirect economic losses resulting from the temporary or permanent exclusion of individuals from the production of gross national product. The assessment of direct losses (due to costs associated with the diagnosis and treatment of pathological conditions caused by IR) was not considered in this

боте не рассматривался; такие потери должны оцениваться применительно к каждому сценарию облучения для каждого источника ИИ. В качестве примера затрат на диагностику и лечение можно привести стоимость госпитализации по профилю «онкология» из тарифов ФОМС⁸, которая составляет около 230 тыс. рублей за одну госпитализацию.

Заключение

В данной работе выполнена консервативная прогнозная монетарная оценка не прямых экономических потерь за счет воздействия различных ИИ на население Российской Федерации. Показано, что потенциальный экономический ущерб от всех ИИ, оцененный в соответствии с методикой из НРБ-99/2009, составляет примерно 700 млрд руб.; от управляемых и снижаемых ИИ – 470 млрд руб. При этом данная монетарная оценка должна использоваться для обоснования расходов на поддержание достигнутого уровня радиационной безопасности, и не может быть использована в качестве оценки реального ущерба и/или затрат на сведение ущерба к пренебрежимо малым значениям. Данные значения целесообразно использовать при подготовке и обосновании различных управленческих решений в сфере радиационной защиты и радиационной безопасности населения.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

Репин Л.В. редактировал промежуточный вариант рукописи.

Библин А.М. редактировал промежуточный вариант рукописи.

Конonenko Д.В. редактировал промежуточный вариант рукописи.

Горский Г.А. редактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной защите от 2007 г.: пер. с англ. / Под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
2. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности GSR Part 3. МАГАТЭ, Вена, 2015. 518 с.
3. ICRP Publication 37. Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection. International Commission in Radiological Protection, Oxford, 1983. 76 p.
4. Ahmed J.U., Daw H.T. Cost-Benefit Analysis and Radiation Protection // IAEA bulletin. 1980. Vol. 22, № 5/6. P. 13–22.
5. Moores B. Cost-risk-benefit analysis in diagnostic radiology: a theoretical and economic basis for radiation protection of the patient // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol. 169, № 1–4. P. 2–10. DOI: 10.1093/rpd/ncv506.
6. Exposure Due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 1: Technical Material. IAEA Safety Reports Series No. 114. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. 187 p.

study; such losses should be evaluated separately for each exposure scenario and each IR source. As an example of diagnostic and treatment costs, the cost of hospitalization under the "oncology" profile, based on the tariffs of the Federal Compulsory Medical Insurance Fund⁸, amounts to approximately 230,000 RUB per hospitalization.

Conclusion

This study provides a conservative forecasted monetary estimation of the indirect economic losses caused by the impact of various IR sources on the population of the Russian Federation. It is demonstrated that the potential economic damage from all IR sources, evaluated according to the methodology outlined in NRB-99/2009, is approximately 700 billion RUB, with 470 billion RUB attributed to managed and mitigable IR sources. This monetary estimation should be used to justify the expenses associated with maintaining the current level of radiological safety and cannot be considered as an evaluation of actual damage and/or costs for reducing the damage to negligible levels. These values are recommended for use in the preparation and justification of various managerial decisions in the field of radiological protection and the radiation safety of the population.

Authors' personal contribution

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

Leonid V. Repin prepared draft of the manuscript.

Artem M. Biblin prepared draft of the manuscript.

Dmitry V. Kononenko prepared draft of the manuscript.

Grigory A. Gorsky prepared draft of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

References

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 332.
2. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards; 2014. 436 p.
3. ICRP Publication 37. Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection. International Commission in Radiological Protection. Oxford; 1983. 76 p.
4. Ahmed JU, Daw HT. Cost-Benefit Analysis and Radiation Protection. *IAEA bulletin*. 1980;22(5/6): 13-22.
5. Moores B. Cost-risk-benefit analysis in diagnostic radiology: a theoretical and economic basis for radiation protection of the patient. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169(1-4): 2-10. DOI: 10.1093/rpd/ncv506.
6. Exposure Due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 1: Technical Material. IAEA Safety Reports Series No. 114. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2023. 187 p.
7. Exposure Due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 2: Considerations in Implementing Requirement 51 of IAEA General Safety Requirements Part 3 (International Basic Safety Standards). IAEA-TECDOC-2011. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2022. 51 p.

⁸Доступно по ссылке: https://lofoms.spb.ru/files/sogl_2024_pril19.xls?1 (Дата обращения: 01.02.2025) [Available from: https://lofoms.spb.ru/files/sogl_2024_pril19.xls?1 (Accessed: February 01.02.2025) (In Russ.)]

7. Exposure Due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 2: Considerations in Implementing Requirement 51 of IAEA General Safety Requirements Part 3 (International Basic Safety Standards). IAEA-TECDOC-2011. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. 51 p.
8. Михеева М.А., Михеева И.В. Динамика рейтинга экономического ущерба от инфекционных болезней как критерий эффективности эпидемиологического контроля // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2020. Т. 97, № 2. С. 174–181. DOI: 10.36233/0372-9311-2020-97-2-174-181.
8. Mikheeva M, Mikheeva I. Ranking dynamics of economic burden of infectious diseases as a criterion of effectiveness of epidemiologic control. *Journal of microbiology, epidemiology and immunobiology*. 2020;97(2): 174-181. DOI: 10.36233/0372-9311-2020-97-2-174-181 (In Russian).

Received: February 10, 2025

Поступила: 10.02.2025

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

Репин Леонид Викторович – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-4857-6792

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

Конonenko 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

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, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0001-7310-9718

Для цитирования: Водоватов А.В., Репин Л.В., Библин А.М., Конonenko Д.В., Горский Г.А. К вопросу монетарной оценки потенциального ущерба, связанного с воздействием ионизирующего излучения на население Российской Федерации // *Радиационная гигиена*. 2025. Т. 18, № 1. С. 132–139. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-132-139

For correspondence: Aleksandr V. Vodovатов – 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 (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)
ORCID: 0000-0002-5191-7535

Leonid V. Repin – Junior Researcher, Information Analytical Center, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0002-4857-6792

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

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

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, Docent, Work and Radiation Hygiene, I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0001-7310-9718

For citation: Vodovатов A.V., Repin L.V., Biblin A.M., Kononenko D.V., Gorsky G.A. Issues of monetary evaluation of potential radiation detriment of the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 132–139. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-132-139

Правила для авторов журнала «Радиационная гигиена»

Правила для авторов составлены на основе «Белой книги Совета научных редакторов о соблюдении принципов целостности публикаций в научных журналах, 2012» (CSE's White Paper on Promotion Integrity in Scientific Journal Publications, 2012 Update) и «Рекомендаций по проведению, описанию, редактированию и публикации результатов научной работы в медицинских журналах, декабрь 2016» (ICMJE Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing and Publication of Scholarly Work in Medical Journals, December 2016).

Принимаются оригинальные научные статьи на русском и английском языках, соответствующие профилю журнала «Радиационная гигиена» и отражающие результаты оригинальных научных исследований авторов, экспериментальные, теоретические статьи, обзоры, краткие сообщения, дискуссионные статьи, рецензии на работы по актуальным вопросам радиационной гигиены, писем в редакцию.

Работы для опубликования в журнале должны быть представлены в соответствии с данными требованиями:

- К опубликованию в журнале принимаются статьи на русском и английском языках. Если статья представлена на английском языке, обязательно нужно полностью дублировать ее и на русском языке. *Обращаем Ваше внимание на качество английского языка!*

- Материалы, представляемые в статье, не должны быть ранее опубликованными в других печатных изданиях. Авторам следует информировать редакцию журнала о том, что какие-то части этих материалов уже опубликованы и могут рассматриваться как дублирующие. В таких случаях в новой статье должны быть ссылки на предыдущие работы. Копии таких материалов прилагаются к рукописи, чтобы редакция имела возможность принять решение, как поступить в данной ситуации. Не допускается направление статей, которые уже напечатаны в других изданиях или представлены для печати в другие издательства.

- Редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи.

- Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать представленные работы. Все статьи, поступающие в редакцию журнала, проходят двойное слепое рецензирование.

- Статья должна сопровождаться официальным направлением учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы. Должно быть представлено экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи. Статья должна быть подписана всеми авторами. Все соавторы должны быть согласны с публикацией текущей версии статьи.

- Рукописи, оформленные не в соответствии с правилами, к дальнейшему рассмотрению не допускаются.

- Объем обзорных аналитических, исторических статей не должен превышать 35 страниц машинописного текста, оригинальных исследований – 25 страниц, дискуссионных статей – 10, кратких сообщений и заметок из практики – 10 страниц.

В названное количество страниц публикаций входит основной текст рукописи таблицы, рисунки и легенды к ним, а также название, фамилия и инициалы авторов, название учреждений, резюме, ключевые слова, список литературы, References, данные об авторах, их личном вкладе в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования (все вышеперечисленное – на русском и английском языках).

- Текст статьи печатается на одной стороне листа формата А4 шрифтом Times New Roman кеглем 14, с межстрочным ин-

тервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева – 2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

СТРУКТУРА СТАТЬИ

Титульный лист должен содержать:

- **Название статьи** должно кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В него необходимо вложить как информативность, так и привлекательность, уникальность научного творчества автора. Не допускается использование сокращений и аббревиатур, а также торговых (коммерческих) названий приборов, медицинской аппаратуры и т.п.).

Приводится на русском и английском языках.

- **Фамилия и инициалы автора(ов).**

Любые изменения в списке авторов после подачи статьи в редакцию должны быть одобрены всеми авторами.

Фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru.

- **Наименование учреждений**, в которых работают авторы с указанием ведомственной принадлежности (Роспотребнадзор, Минздрав России, РАМН и т.п.), город, страна (при этом префиксы учреждений, указывающие на форму собственности, статус организации (ГУ ВПО, ФГБУ, ФБУН и т.д.) не указываются).

Рядом с фамилией автора(ов) и названием учреждения цифрами в верхнем регистре обозначается, в каком учреждении работает каждый из авторов. Если все авторы работают в одном учреждении, указывать место работы каждого автора отдельно не нужно;

Вся информация предоставляется на русском и английском языках. **Указывается официально принятый английский вариант наименования организаций!**

- **Резюме.** После титульного листа размещается резюме статьи на русском и английском языках (объемом не менее 250 слов каждая). Резюме выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В резюме следует излагать только релевантную информацию.

В нем должны быть четко обозначены следующие составные части:

- **Введение (Introduction):** ставится научная проблема и цель статьи.

- **Материалы и методы (Materials and Methods):** даются сведения об объекте и последовательности выполнения исследования.

- **Результаты исследования и обсуждение (Results and Discussion):** приводятся конкретные авторские результаты исследования.

- **Заключение (Conclusion):** указываются практическая значимость и перспективы исследования.

Все пишется сплошным текстом, без выделения абзацев. Для остальных статей (обзор, лекция, дискуссия) резюме должно включать краткое изложение основной концепции статьи, по сути краткое изложение самой статьи.

Резюме не должно содержать аббревиатур и сокращений, кроме общепринятых в мировой научной литературе. Резюме является независимым от статьи источником информации для размещения в различных научных базах данных. **Обращаем особое внимание на качество английской версии резюме!** Оно будет опубликовано отдельно от основного текста статьи и должно быть понятным без ссылки на саму публикацию.

– В конце приводятся **ключевые слова или словосочетания** на русском и английском языках (не более 12) в порядке значимости. **Ключевые слова также не должны содержать аббревиатур и сокращений.** Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования.

Текст статьи

Текст оригинального научного исследования должен состоять из выделяемых заголовками разделов: «Введение», «Цель исследования», «Задачи исследования», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Заключение», «Литература».

Введение (Introduction) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности. Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье. При его написании автор прежде всего должен заявить общую тему исследования, обозначить проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме того, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы. Обзор литературы. Необходимо описать основные современные исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья. Желательно рассмотреть 20–40 источников и сравнить взгляды авторов; часть источников должна быть англоязычной. Важно провести сравнительный анализ с зарубежными публикациями по заявленной проблематике.

В разделе **«Материалы и методы» (Materials and Methods)** должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

Если в статье имеется описание наблюдений на человеке, не используйте фамилии, инициалы больных или номера историй болезни, особенно на рисунках или фотографиях. При изложении экспериментов на животных укажите, соответствовало ли содержание и использование лабораторных животных правилам, принятым в учреждении, рекомендациям национального совета по исследованиям, национальным законам.

Все радиационные единицы следует приводить в международной системе единиц измерения (СИ) (см.: ГОСТ – 8.417 – 81 ГСИ. Единицы физических величин»; В.И. Иванов В.П. Машкович, Э.М. Центер. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

При описании методики исследования можно ограничиться указанием на существо применяемого метода со ссылкой на источник заимствования, в случае модификации – указать, в чем конкретно она заключается. Оригинальный метод должен быть описан полностью.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion). В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и

оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого – доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты желательно сопоставить с предыдущими работами в этой области, как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективности. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и подобного материала оформляются на русском и английском языках.

При первом упоминании терминов, неоднократно используемых в статье (однако не в заголовке статьи и не в резюме), необходимо давать их полное наименование и сокращение в скобках, в последующем применять только сокращение, однако их применение должно быть сведено к минимуму. Сокращение проводится по ключевым буквам слов в русском написании, например: источник ионизирующего излучения (ИИИ) и т.д. Тип приборов, установок следует вводить на языке оригинала, в кавычках; с указанием (в скобках) страны производителя. Например: использовали спектрофотометр «СФ16» (Россия), спектрофлуориметр фирмы «Hitachi» (Япония). Малоупотребительные и узкоспециальные термины также должны быть расшифрованы.

Таблицы

Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком и вставляется в текст сразу после ссылки на нее. Следует уточнить, какие параметры статистической вариабельности оценивались; например, стандартное отклонение или стандартная ошибка среднего. Не следует дублировать данные, содержащиеся в таблице, в тексте статьи, в графиках или диаграммах.

Рисунки

Иллюстрации должны быть четкие, контрастные. Цифровые версии иллюстраций должны быть сохранены в отдельных файлах в формате Tiff, с разрешением 300 dpi и последовательно пронумерованы. Подписи должны быть размещены в основном тексте. Перед каждым рисунком, диаграммой или таблицей в тексте обязательно должна быть ссылка. В подписях к микрофотографиям, электронным микрофотографиям обязательно следует указывать метод окраски и обозначать масштабный отрезок.

Диаграммы должны быть представлены в исходных файлах. Рисунки (диаграммы, графики) должны иметь подпись всех осей с указанием единиц измерения СИ. Легенда выносится за пределы рисунка.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и подобного материала оформляются на русском и английском языках.

Заключение (Conclusion). Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде приводятся главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчерки-

вается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

В конце статьи должны быть размещены следующие данные:

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей. Наш журнал придерживается следующих критериев авторства, разработанных ICMJE и COPE:

Журнал «Радиационная гигиена» принимает следующие критерии авторства:

1) существенный вклад в разработку концепции или планирование научной работы либо в получении, анализе или интерпретации данных работы;

2) составление черновика рукописи или его критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания;

3) окончательное утверждение публикуемой версии рукописи;

4) согласие принять на себя ответственность за все аспекты работы и гарантии того, что все вопросы, связанные с точностью и добросовестностью любой части работы, могут быть надлежащим образом исследованы и урегулированы.

В список авторов не включаются люди, не являющиеся авторами статьи. Имена людей, которые не являются авторами, не отвечают всем четырем критериям, но оказали иную поддержку, указывают в разделе «Благодарности».

Приводятся на русском и английском языках.

Благодарности. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Приводятся на русском и английском языках.

Информация о конфликте интересов. В статье следует указать на реальный или потенциальный конфликт интересов. Если конфликта интересов нет, то следует написать, что автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Приводится на русском и английском языках.

Сведения об источнике финансирования.

Приводятся на русском и английском языках.

Список литературы.

Рекомендуемое количество литературных источников: для оригинальных научных статей – не менее 25 источников, для лекций и обзоров – не более 60 источников, для других статей – не более 15 источников.

Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.

В журнале используется Ванкуверский формат цитирования, который подразумевает ссылку на источник литературы в квадратных скобках и последующее упоминание источников в списке литературы и в порядке упоминания в тексте.

Прилагаются **два списка литературы**.

В первом списке литературы (Литература) библиографическое описание литературных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Необходимо правильно оформить ссылку на источник. Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес до-

ступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально короткие сроки. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи, должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В списке литературы не следует указывать постановления, законы, санитарные нормы и правила, другие нормативно методические документы. Указания на них следует размещать в сносках или внутритекстовых ссылках. Сноски и внутритекстовые ссылки следует представить и на английском языке, написав после английского описания язык текста (In Russ.).

Примеры внутритекстовых ссылок:

.....согласно Норм радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) [перевод на английский язык (In Russ.)]. Илисогласно ГОСТ Р 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

Подстрочные ссылки (сноски):

¹СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

¹МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 "Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations". Moscow, Rospotrebnadzor, 2011, 40 p. (In Russ.)]

ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

Если имеется 3–4 автора, то указываются все. Если от 5 и больше – первые 3 автора, затем ставится «и др.».

Если в **монографии** на обложке указаны основные авторы, их всех следует указать, далее поставив «и др.».

Книги и брошюры:

Сергеев И.В., Смирнова Т.П., Исаков М.Н. Лучевая диагностика в России. СПб.: НИИРГ, 2007. 123 с.

Jenkins P.F. Making sense of the chest xray: a handson guide. New York: Oxford University Press, 2005. 194 p.

Iverson C., Flanagan A., Fontanarosa P.B. et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins, 1998. 660 p.

Многотомные издания или на часть книги:

Пивинский Ю.Е. Общие вопросы технологии // Неформальные огнеупоры. М., 2003. Т. 1, кн. 1. С. 430–447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Основы общей патофизиологии // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. СПб.: ЭЛБИ, 1999. Ч. 1., гл. 2. С. 124–169.

Riffenburgh R.H. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press, 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods, P. 447–486.

Ettinger S.J., Feldman E.C. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders, 2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems, P. 553–598.

Статьи из журнала, сборника:

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 1. С. 46–52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // *Radiation Measurements*. 2008. Vol. 43. P. 859–863.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25–26 октября 2007. М., 2007. С. 50–51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (Дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия. URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (Дата обращения: 16.06.2019).

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Синецын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. *REJR*. 2018. Т. 8, № 3. С. 60–73. DOI: 10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции // *Радиационная гигиена*. 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубли. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // *Военный врач*. 1996. № 8 (1332) С. 5.

Диссертация и автореферат диссертации:

Фенухин В.И. Этнополитические конфликты в современной России: на примере Северо-Кавказского региона: дис. ... канд. полит. наук: защищена 22.01.02: утв. 15.07.02. М., 2002. 215 с.

Кадука М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2001. 23 с.

Второй список литературы (References) полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется также в соответствии с Ванкуверским форматом цитирования. При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов должны быть транслитерированы. Название работы переводится на английский язык. Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

Примеры:

Статья 1-6 авторов

Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCIC: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 891–909.

Stamat IP, Kormanovskaya TA, Gorsky GA, Eremin AV. To the justification of requirements to the control of radiation protection indicators for buildings and facilities during their commissioning. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 10–15 (In Russian).

Статья 7 и более авторов (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»)

Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, Avila R, Spiridonov SI, Klein D, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ¹³⁷Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105–113.

Vodovатов AV, Chipiga LA, Piven PA, Trufanov GE, Berkovich GV, Mashchenko IA, et al. Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 126–135. (In Russian).

Morozov SP, Kuzmina ES, Vetsheva NN, Gombolevsky VA, Lantukh ZA, Polishuk NS, et al. Moscow Screening: Lung Cancer Screening With Low-Dose Computed Tomography. *Problemy sotsialnoy gigiyeny, zdavookhraneniya i istorii meditsiny = Problems of social hygiene, health care and history of medicine*. 2019;27(Special Issue): 630–636. (In Russian) DOI: 10.32687/0869-866X-2019-27-si1-630-636.

Статья в электронном журнале

Errami M, Garner H. A tale of two citations. *Nature*. 2008;451(7177): 397–399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. *Chronicle of Higher Education*. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

Статья в электронном журнале с DOI:

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanagan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. *American Journal of Sports Medicine*. 2012;40(12): 2872–2878. Available from: <http://ajs.sagepub.com/content/40/12/2872> DOI: 10.1177/0363546512458223 [Accessed 19 Feb 2013].

Книга (печатная)

Carlson BM. Human embryology and developmental biology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2009. 541 p.

Книга (электронная)

Shreeve DF. Reactive attachment disorder: a case-based approach. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-1647-00363546512458223> [Accessed 2 Nov 2012]

Отчет официальной организации (государственный, ведомственный, пр.).

Rowe IL, Carson NE. Medical manpower in Victoria. East Bentleigh (AU): Monash University, Department of Community Practice; 1981. 35 p. Report No.: 4.

Leatherwood S. Whales, dolphins, and porpoises of the western North Atlantic. U.S. Dept. of Commerce. Report number: 63; 2001.

Веб-страница

Diabetes Australia. Diabetes globally. Canberra ACT: Diabetes Australia: Available from: <http://www.diabetesaustralia.com.au/en/Understanding-Diabetes/DiabetesGlobally/> [Accessed 5 November 2012].

European Space Agency. Rosetta: rendezvous with a comet. Available from: <http://rosetta.esa.int> [Accessed 15 June 2015].

Из сборника конференций (тезисы)

Wittke M. Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rock. In: Van Cotthem A, Charlier R, Thimus J-F, Tshibangu J-P. (eds.) Eurock 2006: multiphysics coupling and longterm behaviour in rock mechanics: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9–12 May 2006, Liege, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211–216.

Стандарт

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Structural fire design. London: BSI; 2005.

Методические рекомендации/руководство

National Institute for Health and Care Excellence (NICE), Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-1837390683589> [Accessed 27 May 2017].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

После списков литературы указываются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество (полностью) на русском языке и в транслитерации; ученая степень, ученое звание, должность в учреждении/учреждениях, рабочий адрес с почтовым индексом на русском и английском языках, рабочий телефон и адрес электронной почты всех авторов, идентификационный номер ORCID. Сокращения не допускаются.

ПОРЯДОК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ В РЕДАКЦИЮ

Все статьи печатаются в журнале бесплатно.

Направляя статью для публикации в данном журнале, авторы соглашаются со следующим:

- Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0) которая позволяет другим распространять данную работу с обязательным сохранением ссылок на авторов оригинальной работы и оригинальную публикацию в этом журнале.

- Все авторы внимательно прочитали Этику научных публикаций журнала и с пониманием воспримут санкции за его нарушение.

- Авторы статьи принимают положения: «Авторское соглашение (публичная оферта) о публикации статьи в научном журнале «Радиационная гигиена».

- Согласно вступившей в действие IV части Гражданского кодекса Российской Федерации, между авторами статей и редакцией журнала заключается **Лицензионный договор (оферта) о предоставлении права использования произведения** издателю. Полный текст авторского договора (оферты) размещен на сайте журнала в разделе «Правила для авторов».

Основным способом подачи рукописи статьи в редакцию является отправка по электронной почте журнала в форме присоединенных файлов по адресу: journal@niiirg.ru

При подаче рукописи должны быть загружены следующие файлы:

1. Текст рукописи (титальный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of

Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате Tiff, JPEG с разрешением 300 dpi. При отправке файла обязательно указывайте номер рисунка, соответствующий его номеру в статье.

3. Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения издателю. Электронный вариант заполненного и подписанного всеми авторами договора следует отправить в качестве дополнительного файла в формате .pdf.

4. Официальное направление учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы в формате .pdf.

5. Экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи в формате .pdf.

ДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ В СЛУЧАЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАГИАТА, ФАБРИКАЦИИ И ФАЛЬСИФИКАЦИИ ДАННЫХ

В случае обнаружения недобросовестного поведения со стороны автора, плагиата, фабрикация или фальсификация данных редакция руководствуется правилами COPE. Под недобросовестным поведением мы понимаем любые действия ученого, включающие ненадлежащее обращение с объектами изучения или намеренное манипулирование научной информацией, при котором она перестает отражать наблюдаемые исследования; а также поведение ученого, которое не соответствует принятым этическим и научным стандартам.

К недобросовестному поведению журнал «Радиационная гигиена» не относит честные ошибки или честные расхождения в плане, проведении, интерпретации или оценке исследовательских методов, или результатов, или недобросовестное поведение, не связанное с научным процессом.

Справки по телефону: (812)2334283 и (812)2335016 (редакция журнала «Радиационная гигиена»). Факс: (812)2335363, (812)2334283.