

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 17 № 3, 2024



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

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

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

Задачи журнала:

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

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

Корректор О.О. Пантина
Компьютерная верстка
О.С. Кравцовой

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 30.09.2024
Формат 60x84/8. Печать офсетная. 20 печ.л.

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 \(Directory of Open Access Journals\)](http://DOAJ (Directory of Open Access Journals)), VINITI RAN, РГБ и др. (<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. Никифорова» МЧС России, д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

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

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

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

Иванов Виктор Константинович — Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ «Федеральный медицинский исследовательский центр имени П.А. Герцена» Минздрава России, 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)

Архангельская Генриэтта Владимировна — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В.Рамзаева», д.м.н. (Санкт-Петербург, 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 Министерства здравоохранения Российской Федерации; к.м.н., доцент (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

Санжарова Наталья Ивановна — ФГБУН «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» Федерального агентства научных организаций, 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.

Corrector O.O. Pantina
Computer layout O.S. Kravtsova

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)

Natalya I. Sanzharova – All-Russia Research Institute of Agri-cultural 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)

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

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

Aleksandr V. Vodovатов – 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, the 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 Suren – 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)

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 17 № 3, 2024

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- Дружинина П.С., Водоватов А.В., Романович И.К., Чипига Л.А., Беркович Г.В., Ушков А.Д., Нефедов А.О.
Оценка эффективных доз пациентов при проведении низкодозовой компьютерной томографии 7
- Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Емлютина Е.С., Карпенко Е.И., Горяинов В.А.
Динамика содержания ^{137}Cs в молоке сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС 16
- Чипига Л.А., Рыжов С.А., Водоватов А.В., Звонова И.А., Петрякова А.В., Станжевский А.А., Киселев К.Д., Глотова И.В.
Проблемы обращения с биологическими отходами пациентов в радионуклидной диагностике 29
- Завьялов Д.А., Крестинина Л.Ю.
Риск смерти от злокачественных новообразований в Уральской когорте потомков облученного населения 39
- Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Вишнякова Н.М.
Разработка и обоснование метода представления радиационных рисков, связанных с медицинским облучением пациентов 49
- Крестинина Л.Ю.
Риск смерти от гемобластозов в Уральской когорте аварийно-облученного населения 57
- Репин В.С., Варфоломеева К.В., Библин А.М., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Архангельская Г.В.
Содержание трития в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации 67
- 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» 79
- Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Петрякова А.В., Библин А.М., Горский Г.А., Вишнякова Н.М.
Анализ распространенности аварийных (нештатных) ситуаций в ядерной медицине в Российской Федерации 93
- Дружинина Ю.В., Лантух З.А., Толкачев К.В., Солдатов И.В., Шатёнок М.П., Водоватов А.В., Дружинина П.С., Шацкий И.Г., Рыжов С.А.
Референтные диагностические уровни при проведении рентгенографических исследований в г. Москве 103
- Пыхова А.В., Екидин А.А., Васянович М.Е., Антонов К.Л.
Анализ безопасности при ветровом подъеме радиоактивных веществ с береговой линии Теченского каскада водоемов 114
- Голиков В.Ю., Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю.
Модель профессионального облучения работников, выполняющих контроль сварных соединений с помощью переносных дефектоскопов с источниками гамма-излучения 125
- Радин А.И., Марченко Т.А., Раздайковин А.Н.
Анализ горимости лесов Брянской области в зонах радиоактивного загрязнения и за их пределами 133

CONTENTS

Vol. 17 № 3, 2024

RESEARCH ARTICLES

- Druzhinina P.S., Vodovатов A.V., Romanovich I.K., Chipiga L.A., Berkovich G.V., Ushkov A.D., Nefedov A.O.
Patients' effective doses assessment during low-dose computed tomography7
- Fesenko S.V., Isamov N.N., Emlyutina E.S., Karpenko E.I., Goryainov V.A.
Dynamics of ^{137}Cs concentrations in cow milk in the districts of Bryansk region16
- Chipiga L.A., Ryzhov S. A., Vodovатов A.V., Zvonova I.A., Petryakova A.V., Stanzhevsky A.A., Kiselev K.D., Glotova I.V.
Problems of management of patient biological waste in radionuclide diagnostics29
- Zavyalov D.A., Krestinina L.Yu.
Cancer mortality risk in the Urals Cohort of Exposed Population Offspring39
- Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Vishnyakova N.M.
Development and justification of a method for presenting radiation risks associated with medical exposure of patients49
- Krestinina L.Yu.
Risk of death from hematological malignancies in the South Urals Population Exposed to Radiation cohort57
- Repin V.S., Varfolomeeva K.V., Biblin A.M., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Arkhangelskaya G.V.
Tritium content in water bodies in regions of peaceful nuclear explosions in the Russian Federation67
- Ramzaev V. P., Repin V.S.
Activity concentrations of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{241}Am in sieved soil and soil inclusions from the «Taiga» peaceful nuclear explosions site79
- Vodovатов A.V., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Petryakova A.V., Biblin A.M., Gorsky G.A., Vishnyakova N.M.
Analysis of the radiation accidents (events) prevalence in nuclear medicine in the Russian Federation93
- Druzhinina Yu.V., Lantukh Z.A., Talkachev K.V., Soldatov I.V., Shatenok M.P., Vodovатов A.V., Druzhinina P.S., Shatsky I.G., Ryzhov S.A.
Diagnostic reference levels for the city of Moscow during X-ray examinations103
- Pykhova A.V., Ekin A.A., Vasyanovich M.E., Antonov K.L.
Safety analysis of wind-induced resuspension of radioactive materials from the Techensky reservoir cascade coastline114
- Golikov V.Yu., Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Bogatyreva V.Yu.
Model of occupational exposure of workers performing inspection of welded joints using portable flaw detectors with gamma radiation sources125
- Radin A.I., Marchenko T.A., Razdaivodin A.N.
Analysis of forest fire dangers of the Bryansk region in the zones of radioactive contamination and beyond133

СОДЕРЖАНИЕ

Том 17 № 3, 2024

ОБЗОРЫ

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

**Обзор подходов к оценке потенциальной
радоноопасности земельных участков 142**

РЕЦЕНЗИИ

**Рецензия на монографию «Анализ риска здоровью в
стратегии государственного социально-экономического
развития» (под общ. ред. Г.Г. Онищенко,
Н.В. Зайцевой) 154**

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 156

CONTENTS

Vol. 17 № 3, 2024

REVIEWS

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

**A review of approaches to assessment
of potential radon hazard of land plots 142**

NOTICE

**Review of the monograph "Health Risk Analysis in the
Strategy of the State's Socio-Economic Development"
(under the general editorship of G.G. Onishchenko and
N.V. Zaitseva) 154**

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 156

Оценка эффективных доз пациентов при проведении низкодозовой компьютерной томографии

П.С. Дружинина¹, А.В. Водоватов^{1,2}, И.К. Романович¹, Л.А. Чипига^{1,3,4}, Г.В. Беркович⁴, А.Д. Ушков⁵,
А.О. Нефедов⁵

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

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

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

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

⁵Научно-исследовательский институт Фтизиопульмонологии, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Использование компьютерной томографии для проведения диагностики социально значимых заболеваний становится все более распространённым за последние годы. В зарубежной практике разработаны и внедрены схемы скрининга рака лёгкого у лиц, принадлежащих к категориям риска. Данные схемы успешно применяются на протяжении последних 10 лет. При этом используют так называемые «низкодозовые» протоколы сканирования, позволяющие выполнить исследование с эффективной дозой пациента в несколько раз ниже по сравнению со стандартными протоколами. Метод скрининга рака лёгкого с использованием низкодозовой компьютерной томографии начинается внедряться в Российской Федерации. Для обеспечения радиационной безопасности тех лиц, которые попадают под критерии включения в скрининговые программы, или участвуют в биомедицинских исследованиях для апробации скрининга рака лёгкого, необходимо выполнить оценку эффективных доз при проведении низкодозовой компьютерной томографии и сравнить эти дозы с установленными ограничениями доз облучения. В рамках данного исследования была выполнена оценка эффективных доз пациентов, которым были выполнены различные виды низкодозовой компьютерной томографии органов грудной клетки в двух медицинских организациях. Результаты исследования показывают, что добиться не превышения действующего ограничения годовой эффективной дозы в 1 мЗв возможно только для пациентов с массой тела менее 90 кг. Для пациентов с более высокой массы тела минимальная эффективная доза будет находиться в диапазоне 1.2–1.4 мЗв. Результаты работы свидетельствуют о необходимости внесения изменений в действующие нормативно-методические документы Роспотребнадзора для обеспечения возможности применения низкодозовой компьютерной томографии в рамках скрининга для всех категорий лиц.

Ключевые слова: низкодозовая компьютерная томография, эффективная доза, скрининг рака лёгкого, скрининговые исследования.

Введение

Низкодозовая компьютерная томография (НДКТ) - метод компьютерной томографии, при которой пациент за одно исследование получает эффективную дозу меньше, чем при стандартном компьютерно-томографическом (КТ) исследовании [1-3].

НДКТ применяется для диагностики многих анатомических областей, в т.ч. легких, головы, костей, всего тела, почек и мочевыводящей системы [4-10].

В Российской Федерации под НДКТ подразумевается метод компьютерной томографии, при которой пациент за одно исследование получает эффективную дозу менее

1 мЗв. Данная верхняя граница эффективной дозы обусловлена необходимостью выполнить требование п. 5.4.4 НРБ 99/2009: «при проведении обоснованных медицинских рентгенорадиологических профилактических медицинских исследований практически здоровых лиц, годовая эффективная доза не должна превышать 1 мЗв»¹. Аналогичное ограничение в 1 мЗв/год устанавливается и для практически здоровых лиц, принимающих участие в научных исследованиях (т.е. участвующих в клинических испытаниях НДКТ для скрининга рака лёгкого). Для сравнения диапазоны типичных эффективных доз для НДКТ органов грудной клетки в зарубежных странах составляют 0,6-2,5 мЗв [5, 11].

¹ СанПин 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)" [SanPiN 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standards (NRB-99/2009)" (In Russ.)]

Дружинина Полина Сергеевна

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

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

В соответствии с международными подходами, целью скрининга является выявление во внешне здоровой популяции лиц с более высоким риском заболевания или патологического состояния с целью предложения более раннего лечения или вмешательства, что, в свою очередь, позволит обеспечить улучшение состояния здоровья некоторых лиц, прошедших обследование [12]. В Российской Федерации под скринингом понимают первый этап диспансеризации (профилактического медицинского осмотра), направленный на «выявление у граждан признаков хронических неинфекционных заболеваний, факторов риска их развития, а также определения медицинских показаний к выполнению дополнительных обследований и осмотров врачами-специалистами для уточнения диагноза заболевания (состояния) на втором этапе диспансеризации»².

В Российской Федерации мероприятия, направленные на выявление рака легкого, могут проводиться в рамках второго этапа диспансеризации (дополнительное обследование и уточнение диагноза (состояния)). Для граждан в случае подозрения на злокачественные новообразования легкого могут назначать рентгенографию легких или КТ-легких; при этом вид КТ («высокodoзовые» или «низкодозовые») не определен³.

На данный момент в Российской Федерации в медицинском профессиональном сообществе складывается практика использования термина НДКТ-скрининг. Так в отдельных регионах Российской Федерации (например, г. Москва, г. Санкт-Петербург) реализуются локальные программы скрининга рака легкого с применением НДКТ, но статус этих программ не определен. Как правило, все они реализуются в рамках пилотных проектов [14-16].

Ограничение доз облучения при проведении профилактических медицинских исследований в Российской Федерации приводят к разработке целого спектра методик проведения КТ органов грудной клетки, в том числе ультра-НДКТ с эффективной дозой за исследование менее 1 мЗв. Отдельные работы заявляют о возможности выполнить НДКТ с дозой 0,06 мЗв за исследование [4, 13]. Представленные дозы определены для стандартных пациентов и/или фантомов. У отдельных пациентов с высокой массой тела или индексом массы тела дозы облучения могут быть выше по сравнению с заявленными.

Необходимо провести оценку эффективных доз пациентов и качества диагностического изображения при проведении НДКТ для оценки возможности применения низкодозовых протоколов на практике.

В Российской Федерации на текущий момент проходят несколько клинических испытаний по использованию НДКТ для скрининга рака легкого [14-16]. При этом результаты оценки доз облучения пациентов недоступны, или приводятся в обобщенном виде.

Цель исследования – оценка эффективных доз пациентов и качества КТ-изображения для различных протоколов НДКТ легких, используемых в медицинских организациях г. Санкт-Петербурга.

Задачи исследования

1. Оценить эффективные дозы для стандартных пациентов для протоколов НДКТ органов грудной клетки (для скрининга рака легкого, для диагностики COVID-19) с использованием антропоморфного фантома в двух медицинских организациях г. Санкт-Петербурга;
2. Оценить качество полученных диагностических изображений;
3. Провести ретроспективный сбор данных по параметрам протоколов НДКТ органов грудной клетки для пациентов;
4. Оценить полдозависимые эффективные дозы пациентов, которым была выполнена НДКТ на различных протоколах.

Материалы и методы

Работа была выполнена в КТ-отделениях ФБУН «Санкт-Петербургского научно-исследовательского института фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации (далее – СПб НИИФ) и ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации. Исследование проходило в два этапа: 1) определение эффективных доз и оценка качества изображения для протоколов НДКТ с использованием антропоморфного фантома органов грудной клетки; и 2) ретроспективная оценка уровней облучения пациентов, которым были выполнены исследования с использованием протоколов НДКТ органов грудной клетки.

Этап 1. Исследование с использованием антропоморфного фантома

Данный этап был выполнен с использованием фантома грудной клетки взрослого человека Lungman (PH-1 Multipurpose Chest Phantom N1 "Lungman") [17], являющегося точной анатомической моделью человеческого торса, выполненной из материалов, эквивалентных биологическим тканям по поглощению рентгеновского излучения. Данный фантом соответствует стандартному пациенту-мужчине (масса тела 75 кг, рост 175 см). Перед исследованием в легкие фантома были помещены имитаторы патологических образований в легочной ткани.

В легкие фантома было помещено 7 очагов: 5 в правое легкое и 2 в левое легкое. Использовались очаги, выполненные из пеноуретана, полиуретана и марли. Размеры, форма и плотность очагов соответствовали образованиям, характерным для рака легкого [6]. Диапазон плотности очагов находился в пределах от -800 HU до +600 HU.

В СПб НИИФ сканирование фантома проводилось на трех низкодозовых протоколах КТ-исследования грудной клетки, предназначенных для пациентов с разной массой тела: <59 кг, 60-90 кг и >90 кг. Все три протокола используются в данной медицинской организации для скрининга рака легкого. В НМИЦ им. В.А. Алмазова использовался один низкодозовый протокол, предназначенный для выявления очаговых образований в легких, использовавшийся для диагностики COVID-19.

² Приказ Министерства здравоохранения РФ от 27 апреля 2021 г. N 404н «Об утверждении порядка проведения профилактического медицинского осмотра и диспансеризации определенных групп взрослого населения» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated April 27, 2021 N 404n "On approval of the procedure for conducting preventive medical examination and medical examination of certain groups of the adult population" (In Russ.)]

³ В связи с неопределенным статусом НДКТ в отечественных документах в рамках данной работы будет использоваться термин НДКТ-скрининг, как общеупотребительный в отечественной и международной практике.

В СПб НИИФ сканирование фантома проводилось на компьютерном томографе модели Aquilion CT (Toshiba), в НМИЦ им. В.А. Алмазова на компьютерном томографе модели Ingenuity CT (Philips). Исследование фантома проводилось на аппаратах, прошедших контроль эксплуатационных параметров в 2022 году.

Параметры проколов сканирования грудной клетки фантома представлены в таблице 1. Необходимо отметить, что не для всех протоколов применялась функция автоматической модуляции силы тока (см. таблицу 1).

Качество полученных изображений оценивалось по возможности идентифицировать очаги в легких. Была проведена субъективная оценка качества КТ-изображений, в которой принимали участие врачи-рентгенологи исследуемых КТ-отделений (в СПб НИИФ – 2 врача-рентгенолога, в НМИЦ им. В.А. Алмазова – 1 врач-рентгенолог) со стажем работы не менее 7 лет. Врачи оценивали качество изображений, полученных в своих медицинских организациях. Качество КТ-изображений оценивалось с помощью программного обеспечения MicroDicom Viewer. Критерием хорошего качества КТ-изображения была возможность идентифицировать имитаторы очагов в легких.

Этап 2. Сбор данных по пациентам

В СПб НИИФ данные были собраны для 39 пациентов (для протокола <59 кг – 1 пациент, для протокола 60-90 кг – 19 пациентов, для протокола >90 кг – 19 пациентов), в НМИЦ им. В.А. Алмазова – также 39 пациентов (всего 78 пациентов из двух медицинских организаций г. Санкт-Петербурга).

Параметры проведения исследований были получены из DICOM-файлов КТ-исследований. Для каждого КТ-исследования были определены: напряжение на трубке, экспозиция, питч, объемный компьютерно-томографический индекс дозы (далее – $CTDI_{vol}$) и длина сканирования. В обеих медицинских организациях длина

сканирования определялась по топограммам с помощью измерительных инструментов программы MicroDicom Viewer. Особое внимание уделяли радиочувствительным органам (щитовидная железа, печень и др.), чтобы определить попадали они в область сканирования или нет.

Расчет эффективных доз с учетом пола пациента

Эффективные дозы для каждого пациента с учетом его пола были рассчитаны с использованием специализированного программного обеспечения NCICT 3.0 [18]. Данная программа позволяет рассчитать органные и эффективную дозу для пациентов с учетом их пола, а также с учетом модели компьютерного-томографа и параметров проведения КТ-исследований. Полозависимая эффективная доза, рассчитанная в NCICT 3.0 не в полной мере, соответствует определению эффективной дозы Международной комиссии по радиационной защите (далее – МКРЗ) [19-20], так как определяется раздельно для мужского и женского фантомов, а также не учитывает воздействие ионизирующего излучения на лимфатическую систему [21]. Полозависимые эффективные дозы в программе рассчитывались для референтных гибридных фантомов мужчины (рост – 176 см, масса тела – 73 кг) и женщины (рост – 163 см, масса тела – 60 кг).

Статистическая обработка данных была выполнена с помощью программного обеспечения Statistica 12. Достоверность различий определялась с помощью U-критерия Манна-Уитни; различия считались достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Полозависимые эффективные дозы, определенные по результатам сканирования антропоморфного фантома, представлены в таблице 2.

Таблица 1

Параметры проколов сканирования фантома грудной клетки в двух медицинских организациях

[Table 1

Parameters of the chest phantom scanning protocols in two medical organizations]

Медицинская организация [Medical organization]	СПб НИИФ [Research Institute of Phthisiopulmonology]			НМИЦ им. В.А. Алмазова [V.A. Almazov Centre]
	КТ-аппарат [CT scanner]	Toshiba, Aquilion CT		Philips, Ingenuity CT
Параметры протоколов [Protocol parameters]	НДКТ <59 кг [LDCT <59 kg]	НДКТ 60-90 кг [LDCT 60-90 kg]	НДКТ >90 кг [LDCT >90 kg]	НДКТ [LDCT]
Толщина среза, мм [Slice thickness, mm]	1	1	1	1
Напряжение, кВ [Voltage, kV]	135	135	135	100
Время сканирования, мс [Scan time, ms]	500	500	500	959
Сила тока на трубке, мА [Tube current strength, mA]	15	20	35	-
Экспозиция, мАс [Exposure, mAs]	7	10	17	-
Питч [Pitch]	1,387	1,387	1,387	1,04
$CTDI_{vol}$, мГр [$CTDI_{vol}$, mGy]	0,6	0,9	1,5	2,8
Длина сканирования, см [Scan length, cm]	31	31	31	30
DLP, мГр*см [DLP, mGy*cm]	18,6	27,9	46,5	108
Программа автоматической модуляции силы тока, вкл./выкл. [Automatic tube current modulation program, on/off.]	-	-	-	+

Из таблицы 2 видно, что для низкодозовых протоколов в СПб НИИФ полдозависимая эффективная доза не превышает 1 мЗв для протоколов, разработанных для сканирования пациентов с массой тела менее 90 кг. Для пациентов с массой тела выше 90 кг эффективные дозы выше 1 мЗв. Достоверные различия между эффективными дозами для мужчин и женщин отсутствуют. По сравнению с эффективными дозами для стандартного протокола сканирования органов грудной клетки (для данного аппарата в данной медицинской организации) эффективные дозы для протокола <59 кг ниже в среднем в 4,5 раз, для протокола 60-90 кг в среднем ниже в 3 раза, для протокола >90 кг в среднем ниже в 2 раза.

В НМИЦ им. В.А. Алмазова при сканировании фантома на низкодозовом протоколе грудной клетки полдозависимые эффективные дозы составили: 2 мЗв для мужчин и 2,2 мЗв для женщин, что в 2 раза ниже доз для стандартного протокола сканирования (для данного аппарата в данной медицинской организации).

В результате сканирования фантома на низкодозовых протоколах в обеих медицинских организациях было получено удовлетворительное качество КТ-изображений, на которых хорошо визуализировались все очаги в легких. Лучше всего визуализировались очаги со средним значением чисел Хаунсфилда в диапазоне от -630 HU до +600 HU. Менее заметны на КТ-изображении очаги с со средним значением чисел Хаунсфилда -700 HU и ниже.

Распределение эффективных доз, рассчитанных для пациентов, представлены на рисунке.

В СПб НИИФ только одной пациентке было проведено сканирование с использованием низкодозового протокола <59 кг – полдозависимая эффективная доза для данной пациентки составила 0,53 мЗв. Для двух других низкодозовых протоколов медианы полдозависимых эффективных доз составили: 60-90 кг – 0,75 мЗв для мужчин и 0,76 мЗв для женщин, >90 кг – 1,25 мЗв для мужчин и 1,21 мЗв для женщин. Максимальные полдозависимые эффективные дозы не превышали: для протокола 60-90 кг 0,8 мЗв, для протокола >90 кг 1,4 мЗв. Медианная эффективная доза для пациентов в НМИЦ им. В.А. Алмазова составила 1,9 мЗв.

Как в СПб НИИФ, так и в НМИЦ им. В.А. Алмазова полдозависимые эффективные дозы, полученные для фантома в экспериментальной части работы, сопоставимы с полдозависимыми эффективными дозами пациентов, прошедших НДКТ в данной медицинской организации. Различия в дозах облучения пациентов обусловлены различиями в длинах сканирования (средняя длина сканирования ± стандартное отклонение: в НМИЦ им. В.А. Алмазова – 30 ± 2,6 см, в СПб НИИФ – 34 ± 2,7 см).

При субъективной оценке качества изображений эксперты обеих медицинских организаций высказали мнение об удовлетворительном качестве КТ-изображений, которое являлось достаточным для достижения поставленных клинических задач.

НДКТ протоколы в СПб НИИФ направлены на получение такого КТ-изображения, которое позволит своевременно обнаружить патологические изменения в легких (чаще очаговые – опухоли, лимфоузлы, кальцинаты, реже – интерстициальные изменения) при обеспечении эффективной дозы пациента на уровне менее 1 мЗв. Только два протокола (<59 кг и 60-90 кг) полностью удовлетворяют поставленным задачам. Протокол для пациентов с массой тела >90 кг при удовлетворительном качестве КТ-изображения обеспечивал эффективную дозу в диапазоне от 1,1 до 1,4 мЗв. Однако снижение дозы для пациентов с массой тела >90 кг может быть нецелесообразным, если при этом будет потеряна диагностическая значимость КТ-изображения.

Задачей низкодозового протокола грудной клетки в НМИЦ им. В.А. Алмазова является получение КТ-изображений такого качества, которое позволит выявить очаговые интерстициальные, фиброзные и другие изменения легочной ткани, встречающиеся при COVID-19, с меньшей дозой облучения пациента (от 1,3 до 2,2 мЗв), чем при КТ-исследовании грудной клетки на стандартном протоколе (для данного аппарата в данной медицинской организации). Таким образом, в НМИЦ им. В.А. Алмазова низкодозовый протокол грудной клетки полностью выполняет поставленные задачи с учетом того, что он не используется для скрининга.

В связи с тем, что проведение скрининговых исследований для выявления рака легкого с использованием КТ в настоящее время является общепринятой практикой как в зарубежных странах, так и в Российской Федерации, целесообразно внести изменения в отечественные документы, регламентирующие обеспечение радиационной безопасности при проведении рентгенорадиологических исследований практически здоровых лиц. При этом возможны следующие варианты:

- указать, что ограничения годовой эффективной дозы, представленные в НРБ-99/20090 для отдельных сценариев облучения практически здоровых лиц, не распространяются на утвержденные Министерством здравоохранения методы скрининга. Данный подход представлен в основных регулирующих документах МАГАТЭ [22-23];

- данной работы и анализе литературных источников целесообразно установить численные значения граничных доз в диапазоне 2-5 мЗв за одно НДКТ-исследование и разработать рекомендации по их применению. Данное

Таблица 2

Полдозависимые эффективные дозы, рассчитанные для фантома грудной клетки взрослого человека Lungman

[Table 2

Gender-dependent effective doses calculated for the Lungman adult chest phantom]

Медицинская организация [Medical organization]	СПб НИИФ [Research Institute of Phthysiology and Pulmonology]				НМИЦ им. В.А. Алмазова [V.A. Almazov Centre]			
Аппарат [CT scanner]	Toshiba, Aquilion CT				Philips, Ingenuity CT			
Протокол [Protocol]	НДКТ <59 кг [LDCT <59 kg]		НДКТ 60-90 кг [LDCT 60-90 kg]		НДКТ >90 кг [LDCT >90 kg]		НДКТ [LDCT]	
Пол [Gender]	м [m]	ж [f]	м [m]	ж [f]	м [m]	ж [f]	м [m]	ж [f]
Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv]	0,5	0,5	0,7	0,7	1,1	1,2	2,0	2,2

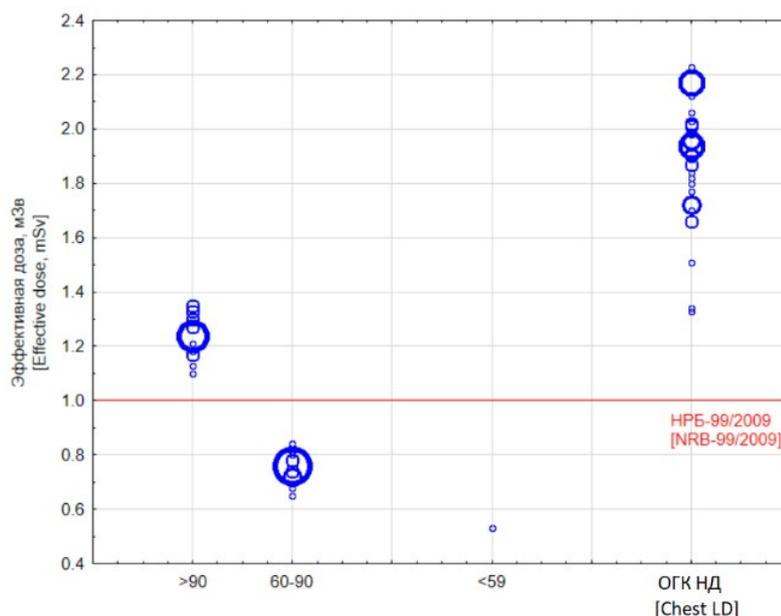


Рис. Эффективные дозы пациентов при сканировании на низкодозовых протоколах в двух медицинских организациях г. Санкт-Петербурга: >90 кг, 60-90 кг, <59 кг – НД протоколы для скрининга рака легкого в СПб НИИФ; ОГК НД – низкодозовый протокол грудной клетки для диагностики COVID-19 в НМИЦ им. В.А. Алмазова
[Fig. Patients' effective doses of low-dose CT protocols in two medical organizations in St. Petersburg: >90 kg, 60-90 kg, <59 kg – LD protocols for lung cancer screening at the Research Institute of Phthiisopulmonology; Chest LD is a low-dose chest protocol for diagnosing COVID-19 at the National Medical Research Center named after V.A. Almazova]

предложение может быть внедрено в практику только после утверждения новой редакции Федерального закона №3-ФЗ «О радиационной безопасности населения»;

– дополнительно необходимо пересмотреть в сторону увеличения ограничения доз облучения практически здоровых лиц, принимающих участие в научных (биомедицинских) исследованиях, так как НДКТ-скрининг в Российской Федерации находится на этапе клинических испытаний и/или апробаций. В противном случае для соблюдения требований НРБ 99/2009 необходимо вводить ограничение на включение пациентов с высокой массой тела в экспериментальные выборки, так как для них невозможно обеспечить неперевышение годовой эффективной дозы в 1 мЗв. В соответствии с регулируемыми документами МАГАТЭ для обеспечения радиационной защиты добровольцев при биомедицинских исследованиях также должны использоваться граничные дозы.

Внедрение в практику данных рекомендаций будет способствовать распространению НДКТ-скрининга рака легкого в отечественной практике и, как следствие, повысит качество оказания онкологической помощи населению Российской Федерации.

Заключение

1. НДКТ грудной клетки может использоваться как в рамках скрининга (например, рака легкого), так и для решения других клинических задач (например, диагностики COVID-19, контроля эффективности лечения, повторных исследований в рамках курса лечения пр.).

2. Низкодозовые протоколы сканирования органов грудной клетки позволяют визуализировать и идентифицировать наиболее распространенные патологии с дозой 0,5-2,2 мЗв.

3. Полозависимые эффективные дозы облучения для стандартного фантома грудной клетки составили: в СПб НИИФ для скрининговых протоколов рака легкого для пациентов <59 кг – 0,5 мЗв (для обоих полов), для пациентов 60-90 кг – 0,7 мЗв (для обоих полов), для пациентов >90 кг – 1,1 мЗв для мужчин и 1,2 мЗв для женщин. В НМИЦ им. В.А. Алмазова для низкодозового протокола грудной клетки – 2,0 мЗв для мужчин и 2,2 мЗв для женщин.

4. Для пациентов полозависимая эффективная доза на изученных низкодозовых протоколах может варьировать в пределах: в СПб НИИФ для скрининговых протоколов рака легкого для пациентов 60-90 кг – от 0,7 до 0,8 мЗв (для обоих полов), для пациентов >90 кг – от 1,1 до 1,4 мЗв (для обоих полов); для протокола <59 кг была определена только одна полозависимая эффективная доза для женщин – 0,5 мЗв; в НМИЦ им. В.А. Алмазова для низкодозового протокола грудной клетки – от 1,3 до 2,2 мЗв (для обоих полов).

5. Для обеспечения радиационной защиты пациентов при проведении НДКТ-скрининга целесообразно отказаться от ограничения годовых эффективных доз, или использовать концепцию граничных доз за одно скрининговое исследование.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Дружинина П.С. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, обработка данных, написание статьи, оформление окончательного варианта статьи для публикации в журнал.

Водоватов А.В. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, осуществление общего научного руководства исследованием, написание статьи.

Романович И.К. – осуществление общего научного руководства исследованием, разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования.

Чипига Л.А. – обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы, редакция промежуточного варианта статьи.

Беркович Г.В. – организация проведения эксперимента, обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы.

Ушков А.Д. – организация проведения эксперимента, обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы.

Нефедов А.О. – организация проведения эксперимента, обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья выполнена в рамках инициативной НИР «Оценка доз облучения и радиационных рисков пациентов при проведении скрининга рака легкого методом низкодозовой компьютерной томографии».

Литература

1. Дуброва Ю.Е. Индукция мутаций в половых клетках National Lung Screening Trial Research Team. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening // *The New England Journal of Medicine*. 2011. Vol. 365, No 5. P. 395-409. DOI: 10.1056/NEJMoa1102873. Epub 2011 Jun 29. PMID: 21714641; PMCID: PMC4356534.
2. Baldwin D.R., Duffy S.W., Wald N.J. et al. UK Lung Screen (UKLS) nodule management protocol: modelling of a single screen randomised controlled trial of low-dose CT screening for lung cancer // *Thorax*. 2011. Vol. 66, No 4. P. 308-13. DOI: 10.1136/thx.2010.152066. Epub 2011 Feb 11. PMID: 21317179; PMCID: PMC3063456.
3. Jonas D.E., Reuland D.S., Reddy S.M. et al. Screening for Lung Cancer With Low-Dose Computed Tomography: Updated Evidence Report and Systematic Review for the US Preventive Services Task Force // *JAMA*. 2021. Vol. 325, No 10. P. 971–987. DOI: 10.1001/jama.2021.0377.
4. Департамент здравоохранения города Москвы. Методические рекомендации по скринингу рака легкого №73. 2020. 55 с.
5. Морозов С. П., Кузьмина Е. С., Ветшева Н. Н. и др. Московский скрининг: скрининг рака легкого с помощью низкодозовой компьютерной томографии // *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*. 2019. №27 (спецвыпуск). С. 630-636. DOI: 10.32687/0869-866X-2019-27-si1-630-636.
6. Беркович Г.В., Водоватов А.В., Чипига Л.А. и др. Результаты апробации комплексной экспертной оценки качества КТ-изображений органов грудной клетки, полученных на низкодозовых протоколах сканирования с применением методов итеративных реконструкций // *Лучевая диагностика и терапия*. 2021. Т. 12, № 3. С.54–71. DOI: 10.22328/2079-5343-2021-12-3-54-71.
7. Karostik D.V., Kamyshanskaya I.G., Cheremisin V.M. et al. Evaluation of low-dose CT implementation for lung cancer screening in a general practice hospital // *Journal of Physics: Conference Series*, Saint Petersburg, 23–24 November, 2017. Vol. 967. Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2018. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/967/1/012006. EDN UYCOFP.
8. Николаев А.Е., Шапиев А.Н., Коркунова О.А. и др. Возможность оценки коронарного кальция по данным ультра-низкодозной компьютерной томографии, используемой в проекте "московский скрининг рака легкого// *Радиационная фармакотерапия в кардиологии*. 2021. Т. 17. № 3. С. 414-422. DOI: 10.20996/1819-6446-2021-06-18. EDN LKSUMZ.
9. NCCN Guidelines Lung Cancer Screening. URL: https://www.nccn.org/professionals/physician_gls/pdf/lung_screening.pdf (Дата обращения: 20.03.2024).
10. Филатова Д.А., Сеницын В.Е., Мершина Е.А. Возможности снижения лучевой нагрузки при проведении компьютерной томографии для оценки изменений в лёгких, характерных для COVID-19: использование адаптивной статистической итеративной реконструкции // *Digital Diagnostics*. 2021. Т. 2, № 2. С. 94–104. DOI: 10.17816/DD62477.
11. Accuracy of Ultra-Low-Dose CT (ULDCT) of the Chest Compared to Plain Film in an Unfiltered Emergency Patient Cohort // *Study protocol and statistical analysis plan / Version 1.3 24th of April 2019*.
12. Всемирная Организация Здравоохранения. Программы скрининга: краткое руководство. 2020. 72 с. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/330828/9789289054812-rus.pdf> (Дата обращения: 07.09.2023).
13. Гомболевский В.А., Чернина В.Ю., Блохин И.А. и др. Основные достижения низкодозной компьютерной томографии в скрининге рака легкого. Туберкулез и болезни легких. 2021. Vol. 99, No 1. P. 61-70. DOI: 10.21292/2075-1230-2021-99-1-61-70.
14. Проект Департамента Здравоохранения города Москвы «Низкодозная компьютерная томография грудной клетки – скрининг рака легкого и других заболеваний органов грудной клетки». URL: <https://mosgorzdrav.ru/ru-RU/health/default/card/80.html> (Дата обращения: 07.09.2023).
15. Проект скрининга рака легкого у людей в группе риска для выявления заболевания на ранней стадии и оказания своевременной помощи. URL: <https://spiral-ldct.ru/> (Дата обращения: 07.09.2023).
16. Скрининг рака легкого, а также других заболеваний органов грудной клетки. URL: <https://lk.almazovcentre.ru/baza-znaniy/articles/kt/> (Дата обращения: 07.09.2023).
17. PH-1 Multipurpose Chest Phantom N1 "Lungman". User manual. 2020. 8p. URL: https://www.kyotokagaku.com/products_data/ph1_manual_01_en.pdf (Дата обращения: 07.09.2023).
18. Lee C., Kim K.P., Bolch W.E. et al. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, No 4. P. 891-909. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/891. Epub 2015 Nov 26. PMID: 26609995.
19. Публикация 103 Международной Комиссии по Радиационной защите (МКРЗ) / пер. с англ., под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
20. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // *Annals of the ICRP*. 1991. 21. 90 p.
21. Чипига Л.А. Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 1. С. 104-114. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-104-114.
22. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. International Atomic Energy Agency. Specific safety guide. Vienna: IAEA, 2018. NoSSG-46. 340 p.
23. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards/International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards. IAEA: Vienna, 2015. GSR Part 3. 518 p.
24. IAEA. Justification of Practices, Including Non-Medical Human Imaging// *IAEA Safety Standards Series No. GSG-5 General Safety Guides*. 2014. 80 p.

Поступила: 05.04.2024

Дружинина Полина Сергеевна – младший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: druzhininapauline@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2921-067X

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 Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Романович Иван Константинович – доктор медицинских наук, профессор, академик Российской академии наук, 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

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

ORCID: 0000-0001-9153-3061

Беркович Глеб Владимирович – заведующий кабинетом компьютерной томографии, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-7077-7320

Ушков Алексей Дмитриевич – врач-рентгенолог высшей квалификационной категории Санкт-Петербургского научно-исследовательского института Фтизиопульмонологии Министерства здравоохранения Российской Федерации; член Санкт-Петербургского радиологического общества, Санкт-Петербург, Россия

Нефедов Андрей Олегович – старший научный сотрудник, к.м.н., врач-онколог высшей квалификационной категории, торакальный хирург Санкт-Петербургского научно-исследовательского института Фтизиопульмонологии Министерства здравоохранения Российской Федерации; Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Дружинина П.С., Водоватов А.В., Романович И.К., Чипига Л.А., Беркович Г.В., Ушков А.Д., Нефедов А.О. Оценка эффективных доз пациентов при проведении низкодозовой компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 7–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-7-15.

Patients' effective doses assessment during low-dose computed tomography

Polina S. Druzhinina¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Ivan K. Romanovich¹, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Gleb V. Berkovich⁴, Alexey D. Ushkov⁵, Andrey O. Nefedov⁵

¹Saint 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

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

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

⁴V. Almazov National Medical Research Center, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

⁵Research Institute of Phthiopolmonology, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

Computed tomography has become increasingly common for diagnosing socially significant diseases in recent years. In foreign practice, screening schemes for lung cancer in people belonging to risk categories have been developed and implemented. These schemes have been successfully used over the past 10 years. In this case, "low-dose" scanning protocols are used, which make it possible to perform examination with

Polina S. Druzhinina

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

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

patient effective dose several times lower compared to standard protocols. Lung cancer screening methods using low-dose computed tomography are beginning to be introduced in the Russian Federation. To ensure the radiation safety of those individuals eligible for inclusion in screening programs or participating in biomedical research testing lung cancer screening, it is necessary to evaluate effective doses from low-dose computed tomography and compare these doses to established radiation dose limits. This study assessed the patients' effective doses who underwent different types of low-dose computed tomography of chest at two medical organizations. The results of the study show that it is possible to achieve non-exceedance of the current annual effective dose limit of 1 mSv only for patients weighing less than 90 kg. For patients with higher body weight, the minimum effective dose will be in the range of 1.2 – 1.4 mSv. The results of the study indicate the need to make changes to the current regulatory and methodological documents of Rosпотребнадзор to ensure the possibility of using low-dose computed tomography as part of screening for all categories of people.

Key words: low-dose computed tomography, effective dose, lung cancer screening, screening examination.

Authors' personal contribution

Polina S. Druzhinina – developed the design of the survey, defined the goals and objectives, data processing, wrote the manuscript, arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Aleksandr V. Vodovatov – developed the design of the survey, defined the goals and objectives, data processing, provided general scientific management of the project, wrote the manuscript.

Ivan K. Romanovich – provided general scientific management of the project, developed the design of the survey, defined the goals and objectives.

Larisa A. Chipiga – data processing, discussion and analysis of the results, editing of the article.

Gleb V. Berkovich – organization of data collection, discussion and analysis of the results.

Alexey D. Ushkov – organization of data collection, discussion and analysis of the results.

Andrey O. Nefedov – organization of data collection, discussion and analysis of the results.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The article is a part of an initiative research project. "Assessment of radiation doses and radiation risks of patients during lung cancer screening using low-dose computed tomography".

References

1. National Lung Screening Trial Research Team. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening. *The New England Journal of Medicine*. 2011;365(5): 395-409. DOI: 10.1056/NEJMoa1102873. Epub 2011 Jun 29. PMID: 21714641; PMCID: PMC4356534.
2. Baldwin DR, Duffy SW, Wald NJ, Page R, Hansell DM, Field JK. UK Lung Screen (UKLS) nodule management protocol: modelling of a single screen randomised controlled trial of low-dose CT screening for lung cancer. *Thorax*. 2011;66(4): 308-13. DOI: 10.1136/thx.2010.152066. Epub 2011 Feb 11. PMID: 21317179; PMCID: PMC3063456.
3. Jonas DE, Reuland DS, Reddy SM, Nagle M, Clark SD, Weber RP, et al. Screening for Lung Cancer With Low-Dose Computed Tomography: Updated Evidence Report and Systematic Review for the US Preventive Services Task Force. *JAMA*. 2021;325(10): 971-987. DOI: 10.1001/jama.2021.0377
4. Moscow City Health Department. Guidelines for lung cancer screening No. 73. 2020. 55 p. (In Russian).
5. Morozov SP, Kuzmina ES, Vetsheva NN, Gombolevisky VA, Lantukh ZA, Polishuk NS, et al. Moscow Screening: Lung Cancer Screening With Low-Dose Computed Tomography. *Problemy sotsialnoy gigiyeny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny = Problems of social hygiene, health care and history of medicine*. 2019;27(Special Issue): 630-636. (In Russian) DOI: 10.32687/0869-866X-2019-27-si1-630-636. PMID: 31747155.
6. Berkovich GV, Vodovatov AV, Chipiga LA, Trufanov GE. The results of approbation of a comprehensive expert assessment of the quality of CT images of the chest obtained on low-dose scanning protocols using iterative reconstruction methods. *Lučevaya diagnostika i terapiya = Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2021;12(3): 54-71. (In Russian) DOI: 10.22328/2079-5343-2021-12-3-54-71.
7. Karostik DV, Kamyshanskaya IG, Cheremisin VM, Drozdov AA, Vodovatov AV. Evaluation of low-dose CT implementation for lung cancer screening in a general practice hospital. *Journal of Physics: Conference Series*, Saint Petersburg. Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing; 2018. Vol. 967. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/967/1/012006. EDN UYCOFP.
8. Nikolaev AE, Shapiev AN, Korkunova OA, Mukhutdinova G., Tkacheva PV, Suleymanova MM, et al. Possibility of assessing coronary calcium using ultra-low-dose computed tomography data used in the Moscow Lung Cancer Screening project. *Ratsionalnaya farmakoterapiya v kardiologii = Rational Pharmacotherapy in Cardiology*. 2021;17(3): 414-422. (In Russian).
9. NCCN Guidelines Lung Cancer Screening. Available from: https://www.nccn.org/professionals/physician_gls/pdf/lung_screening.pdf (Accessed: 03.20.2024).
10. Filatova DA, Sinitsin VE, Merzhina EA. Opportunities to reduce the radiation exposure during computed tomography to assess the changes in the lungs in patients with COVID-19: use of adaptive statistical iterative reconstruction. *Digital Diagnostics*. 2021;2(2): 94-104. (In Russian) DOI: 10.17816/DD62477.
11. Accuracy of Ultra-Low-Dose CT (ULDCT) of the Chest Compared to Plain Film in an Unfiltered Emergency Patient Cohort. Study protocol and statistical analysis plan/Version 1.3 24th of April 2019.
12. World Health Organization. Screening programs: a quick guide. 2020. 72 p. Available from: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/330828/9789289054812-rus.pdf> (Accessed: 20.03.2024).
13. Gombolevisky VA, Chernina VYu, Blokhin IA, Nikolaev AE, Barchuk AA, Morozov SP. Main achievements of low-dose computed tomography in lung cancer screening. *Tuberkulez i bolezki legkikh = Tuberculosis and Lung Diseases*. 2021;99(1): 61-70. (In Russian) DOI: 10.21292/2075-1230-2021-99-1-61-70.
14. Project of the Moscow Department of Health "Low-dose computed tomography of the chest - screening for lung cancer and other diseases of the chest". Available from:

- <https://mosgorzdrav.ru/ru-RU/health/default/card/80.html> (Accessed: 20.03.2024). (In Russian).
15. Project for lung cancer screening in people at risk to detect the disease at an early stage and provide timely assistance. Available from: <https://spiral-ldct.ru/> (Accessed: 09.07.2023). (In Russian).
 16. Project for lung cancer screening in people at risk to detect the disease at an early stage and provide timely assistance. Available from: <https://spiral-ldct.ru/> (Accessed: 09.07.2023). (In Russian).
 17. PH-1 Multipurpose Chest Phantom N1 "Lungman". User manual. 2020. 8 p. Available from: https://www.kyotokagaku.com/products_data/ph1_manual_01_en.pdf (Accessed: 07.09.2023).
 18. Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 891-909. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/891. Epub 2015 Nov 26. PMID: 26609995.
 19. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4).
 20. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 1991;21: 90.
 21. Chipiga LA. Evaluation of tube current modulation programs for the optimization of scan protocols in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 104-114. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-104-114.
 22. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. International Atomic Energy Agency. Specific safety guide. Vienna: IAEA; 2018. NoSSG-46. 340 p..
 23. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards/International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards. IAEA: Vienna; 2015. GSR Part 3. 518 p.
 24. IAEA. Justification of Practices, Including Non-Medical Human Imaging// IAEA Safety Standards Series No. GSG-5 General Safety Guides; 2014. 80 p.

Received: April 05, 2024

For correspondence: Polina S. Druzhinina – junior research fellow, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: druzhininapauline@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-2921-067X

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, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Ivan K. Romanovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of Russian Academy of Sciences, Director 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

Larisa A. Chipiga – Candidate of Engineering Sciences, research fellow, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; research fellow, A. Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies, Ministry of Healthcare of the Russian Federation; docent, V. Almazov National Medical Research Center, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0001-9153-3061

Gleb V. Berkovich – Head of the Computed Tomography department, V. Almazov National Medical Research Center, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-7077-7320

Alexey D. Ushkov – radiologist of the highest qualification category of the Saint - Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, member of the Saint - Petersburg Radiological Society, Saint - Petersburg, Russia

Andrey O. Nefedov – senior researcher, Candidate of Medical Sciences, oncologist of the highest qualification category, thoracic surgeon of the Saint Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint - Petersburg, Russia

For citation: Druzhinina P.S., Vodovатов A.V., Romanovich I.K., Chipiga L.A., Berkovich G.V., Ushkov A.D., Nefedov A.O. Patients' effective doses assessment during low-dose computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 7–15. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-7-15.

Динамика содержания ^{137}Cs в молоке сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС

С.В. Фесенко¹, Н.Н. Исамов¹, Е.С. Емлютина¹, Е.И. Карпенко¹, В.А. Горяинов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Обнинск, Россия

²Департамент сельского хозяйства Брянской области, Брянск, Россия

Публикация продолжает цикл работ, посвященных изучению закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в продукции сельскохозяйственного производства после аварии на Чернобыльской АЭС. Целью настоящих исследований являлся анализ данных, описывающих изменение содержания ^{137}Cs в молоке сельскохозяйственных животных. Представлена информация по проведению защитных мероприятий в животноводстве, описана система радиологического мониторинга загрязнения молока. Показано, что динамика изменения содержания ^{137}Cs в молоке определялась особенностями проведения агротехнических и ветеринарных мероприятий. Эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в молоке в первый период после аварии (1987–1992 гг.) варьировали в пределах от 1 до 2,0 лет. В последующем снижение загрязнения кормов замедлилось, а периоды полуснижения варьировали от 5 до 25 лет в зависимости от объемов агротехнических и ветеринарных мероприятий.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, агропромышленное производство, молоко сельскохозяйственных животных, юго-западные районы Брянской области, радиационный мониторинг, ^{137}Cs .

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС была исключительно тяжелой для сельского хозяйства. Регион аварии относится к зоне, где сельскохозяйственный сектор является одним из основных в экономике. Плотность радиоактивного загрязнения на значительных территориях оказалась достаточно высокой, чтобы затруднить производство и использование получаемой на них сельскохозяйственной продукции [1–7]. В составе радиоактивных веществ, поступивших в результате аварии в окружающую среду, присутствовали биологически подвижные ^{90}Sr , ^{131}I и ^{137}Cs , которые интенсивно мигрируют по цепи: почва – растения – животные и накапливаются в сельскохозяйственной продукции [1]. За исключением 30-км зоны ЧАЭС и нескольких прилегающих районов Беларуси и Украины, в которых вклад ^{90}Sr в загрязнение сельскохозяйственной продукции был значим, долгосрочные последствия Чернобыльской аварии для сферы сельскохозяйственного производства определялись ^{137}Cs [7–9]. При этом важную роль в формировании дозовых нагрузок на население в большинстве случаев играли и играют продукты животного происхождения и, в первую очередь, молоко [7, 10–12]. Это предопределило особое внимание изучению динамики содержания ^{137}Cs в молоке и молочных продуктах [9–12].

Для оценки радиологической ситуации в сфере агропромышленного производства и планирования защитных и реабилитационных мероприятий в регионах, подвергшихся

загрязнению, был организован радиационный мониторинг сельскохозяйственной продукции [14–19]. Система мониторинга в сельском хозяйстве включала Центр агрохимрадиологии «Брянский», Ветеринарный радиологический центр Брянской области, а также районные ветеринарные и агрохимические лаборатории [14]. Особенно интенсивно мониторинг проводился в шести юго-западных районах Брянской области и трех южных районах Калужской области, что позволило получить уникальные данные по поведению ^{137}Cs в окружающей среде и поступлению его в молоко после аварии на Чернобыльской АЭС [9, 15–18]. Проведение мониторинга в сфере сельского хозяйства в течение 35 лет после Чернобыльской аварии сыграло определяющую роль в выявлении сельскохозяйственной продукции, не соответствующей допустимым уровням, обеспечило эффективное планирование защитных и реабилитационных мероприятий в сфере агропромышленного комплекса (АПК), а также позволило обосновать нормативы допустимых уровней содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции в различные периоды времени после аварии [18, 19]. Анализ динамики содержания ^{137}Cs в молоке с 1986 по 1992 годы представлен в наших ранних публикациях [8–11, 16, 19, 20], однако данные за последующий период практических не обобщались. Это ограничивает использование результатов мониторинга, проводимого организациями Минсельхоза России, для решения задач, связанных с обоснованием перехода населения, проживающего на загрязненных территориях, к условиям нормальной жизнедея-

Фесенко Сергей Викторович

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Адрес для переписки: 249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Россия; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

ятельности и оценки последствий других потенциально возможных аварий [21].

В первых двух публикациях этого цикла [23, 24] представлены данные по динамике содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства и кормах сельскохозяйственных животных, получаемых на протяжении 35 лет после Чернобыльской аварии, в то время как настоящая статья описывает динамику содержания ^{137}Cs в молоке. Данные по концентрациям ^{137}Cs в мясе животных после аварии на Чернобыльской АЭС будут представлены в последней публикации этого цикла. Для облегчения сравнения закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в различных видах сельскохозяйственной продукции все статьи, посвященные этой теме, имеют близкую структуру и аналогичное представление полученных результатов.

Цель исследования - анализ данных радиозоологического мониторинга содержания ^{137}Cs в молоке в юго-западных районах Брянской области, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС.

Задачи исследования

1. Обобщение данных по содержанию ^{137}Cs в молоке сельскохозяйственных животных, полученных организациями Минсельхоза России и ВНИИРАЭ после аварии на Чернобыльской АЭС.
2. Определение периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в молоке крупного рогатого скота в различные временные интервалы после аварии.
3. Оценка роли факторов, определяющих динамику снижения содержания ^{137}Cs в молоке на протяжении 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС.

Исходные данные

Для анализа закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в молоке использовались данные радиозоологического мониторинга, организованного Ветеринарным радиологическим центром Брянской области и его лабораторными

подразделениями в 6 юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красногорском и Новозыбковском [1, 10, 18–20]. Динамика объемов проведения мониторинга молока и кормов сельскохозяйственных животных (по данным работы [24]) показана на рис. 1, а общее число отобранных проб и характеристики загрязнённых районов приведена в таблице 1. В 1986–1989 гг. мониторинг загрязнения молока проводился главным образом в общественном секторе, при этом отбор проб организациями ветеринарной службы носил ограниченный характер. В первую очередь это было связано с недостаточным обеспечением этих служб средствами, обеспечивающими достаточную точность измерений. Однако, уже в 1991 году Минсельхозом РФ были проведены закупки современного на тот момент оборудования, и существенно увеличено число проб молока и мяса сельскохозяйственных животных.

Начиная с 1991 года, мониторинг загрязнения продукции животноводства и кормов для животных охватывал все общественные хозяйства наиболее загрязненных юго-западных районов Брянской области, и молоко, получаемое в частном секторе этих районов (таблица 1). В период с 1992 по 2012 год объемы исследований проб молока, мяса и кормов для животных на территории Брянской области были максимальными. В несколько меньших масштабах этот мониторинг проводился в Калужской, Орловской и Тульской областях.

Увеличение интенсивности мониторинга загрязнения молока в 2000–2007 годах было связано и с принятием национальных программ Российской Федерации по преодолению последствий радиационных аварий [2]. Начиная с 2008 года, объемы отбора проб молока уменьшились и в 2015 после расформирования служб, осуществляющих ветеринарный радиологический надзор продукции животноводства, мониторинг молока, проводимый службами Минсельхоза, был сильно сокращен, а проводимый в этот период отбор проб не носил систематический характер.

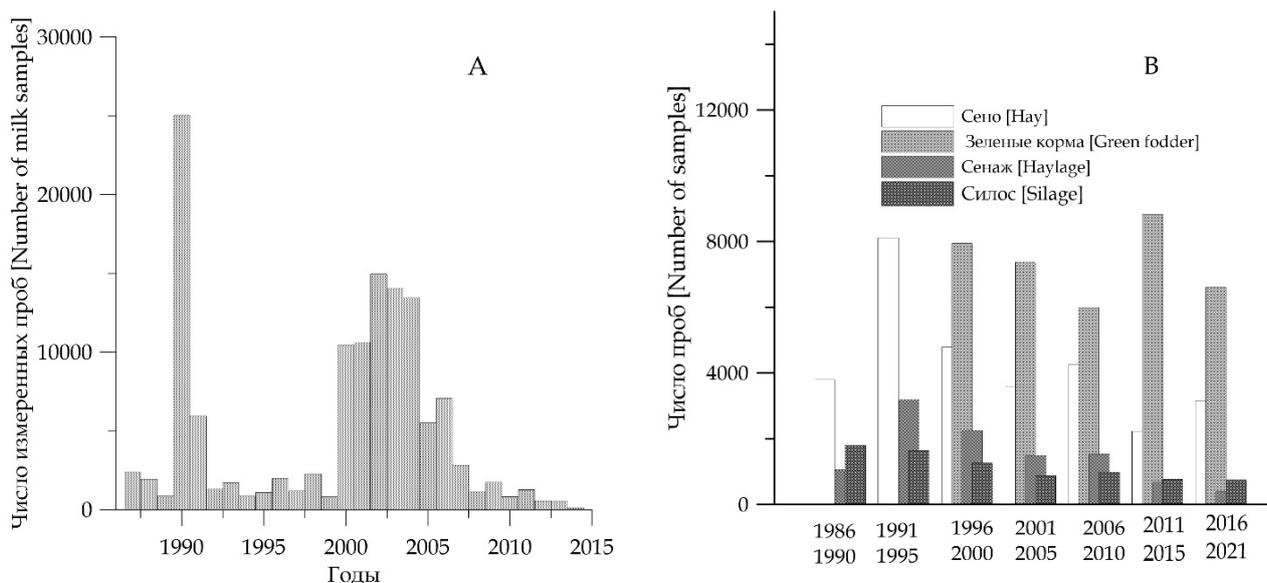


Рис. 1. Объемы отбора проб молока (А) и кормов сельскохозяйственных животных (В) в юго-западных районах Брянской области в 1986–2021 гг.

[Fig. 1. Quantity of milk (A) and feeds (B) samples taken in southwestern districts of Bryansk region in 1986–2021]

Характеристики загрязненных районов и количество данных, использованных для анализа

[Table 1]

Characteristics of contaminated areas and quantity of data used for evaluations]

Районы [Districts]	Плотность загрязнения ^{137}Cs , $\text{кБк}/\text{м}^2$ [Contamination density ¹ , kBq/m^2]			Период проведения [Period of sampling]		Число проб молока [Number of milk samples]	
	Сенокосы [Haylands]	Пастбища [Pastures]	Пашня [Arable lands]	Общественное [Collective]	Частное [Private]	Общественное [Collective]	Частное [Private]
Гордеевский [Gordeevsky]	546 (409) ²	601 (421)	366 (210)	2000–2014	1990–2014	15806	36786
Злынковский [Zlunkovsky]	745 (544)	589 (486)	361 (333)	2000–2014	2000–2011	4639	30695
Климовский [Klimovsky]	259 (188)	273 (188)	156 (93)	2000–2006	2000–2007	1716	2727
Клинцовский [Klintsovsky]	393 (431)	442 (455)	232 (179)	2000–2014	2000–2009	14578	16546
Красногорский [Krasnogorsky]	590 (586)	525 (655)	320 (313)	1990–2011	1990–2011	20630	41675
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1011 (646)	884 (596)	526 (318)	2000–2014	1990–2014	47936	41947
Всего [Total]	–	–	–	–	–	201418	201418

¹Плотность загрязнения ^{137}Cs дана на май 1986 года [¹ Contamination density by ^{137}Cs is given for May 1986].

²В скобках дано среднее квадратичное отклонение [²The standard deviations are given in the brackets.]

Наиболее интенсивно мониторинг проводился в хозяйствах и населенных пунктах юго-западных районов Брянской области, в которых отмечались высокие плотности загрязнения ^{137}Cs сенокосов и пастбищ. Данные, приведенные в таблице 1, отражают результаты отбора проб молока, проведенного в 177 хозяйствах с плотностью загрязнения кормовых угодий ^{137}Cs от 17 до 3800 $\text{кБк}/\text{м}^2$. Из них в 55 хозяйствах плотность загрязнения сенокосов в 1986 год была меньше 185 $\text{кБк}/\text{м}^2$, в 46 плотность загрязнения сенокосов превышала 555 $\text{кБк}/\text{м}^2$. В 76 хозяйствах плотность загрязнения была в диапазоне между 185 и 555 $\text{кБк}/\text{м}^2$. Значительная доля измерений (около 90 тысяч) относится к Новозыбковскому району.

После аварии на Чернобыльской АЭС были введены нормативы, определяющие возможность использования загрязненных продуктов питания, включая молоко. Эти нормативы использовались как индикаторы «загрязненной» продукции и устанавливались исходя не только на основе общих радиологических критериев, но и на основе экономических условий и возможности достижения этих нормативов в послеаварийный период. По мере улучшения радиационной обстановки значения ВДУ для $^{134,137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в продуктах питания пересматривались в сторону уменьшения [20]. После аварии на Чернобыльской АЭС также были введены контрольные уровни (K_c) содержания ^{137}Cs в кормах, которые устанавливались таким образом, чтобы гарантировать отсутствие превышения допустимых уровней содержания радионуклидов в пищевых продуктах, и мотивировать снижение содержания ^{137}Cs в продукции до реально достижимого низкого уровня [21, 24].

При анализе закономерностей динамики содержания радионуклидов в молоке необходимо учитывать влияние мероприятий, проводимых в загрязненных районах, включая коренное и поверхностное улучшение лугов и пастбищ и применение ферроцинсодержащих препаратов.

В первый период после аварии на Чернобыльской АЭС культуртехнические мероприятия проводились на больших площадях [24]. В последствии, вследствие экономических проблем, объемы проведения культуртехнических мероприятий снизились, что привело к увеличению объемов загрязненной продукции. Наиболее значительные объемы проведения культур технических мероприятий отмечались в первые 5–7 лет после аварии, и к 1991 года практически все доступные кормовые угодья в юго-западных районах Брянской области были охвачены этими мероприятиями [24]. В 1996–2000 гг. проведение этих мероприятий было минимальным и не соответствовало потребности в окультуривании сельскохозяйственных угодий. В 2000–2013 годах в рамках федеральных целевых программ работы по реабилитации загрязненных территорий эти мероприятия проводились в достаточно больших объемах, что определило снижение загрязнения продукции растениеводства и кормов для сельскохозяйственных животных. [23, 24]. Особенности проведения культуртехнических мероприятий в Брянской области и их влияние на поступление ^{137}Cs в корма сельскохозяйственных животных детально рассмотрены в публикации [24].

Начиная с 1993 года было начато активное применение ферроцинсодержащих препаратов (ФСР), что позволило в значительной степени компенсировать уменьшение интенсивности проведения реабилитационных мероприятий в кормопроизводстве (рис. 2). ФСР в достаточно больших объемах применялись в период уменьшения объемов проведения культуртехнических мероприятий, что позволило в значительной степени избежать существенного увеличения загрязнения молока, производимого в юго-западных районах Брянской области.

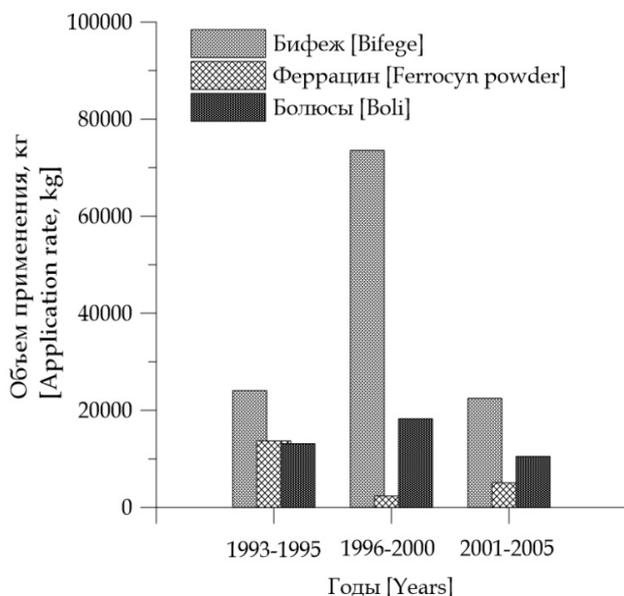


Рис. 2. Применения ферроцинсодержащих препаратов в Брянской области [25]

[Fig. 2. Administration of hexacyanoferrate compounds in Bryansk region [25]]

Анализ данных

Для обработки данных использовался подход, предложенный в работе [26]. Для каждой выборки применялся критерий отбраковки выбросов, при этом для малых выборок (менее 25 значений) применяли критерий Диксона, а к большим – применяли стандартные статистические критерии. После отбраковки недостоверных данных определяли параметры распределения. Периоды полуснижения рас-

считывали с помощью стандартных методов линейной регрессии [26].

Влияние состава рациона на динамику содержания ¹³⁷Cs в молоке

Содержание радионуклидов в молоке определяется суточным поступлением радионуклидов в организм коров, которое зависит от концентраций радионуклидов в кормах, потребляемых животными и рационов кормления, которые сбалансированы по содержанию сухого вещества, питательных веществ и микроэлементов [15, 27]. Основные типы рационов кормления животных, используемые в юго-западных районах Брянской области, приведены в таблице 2. Эти рационы включали 5 основных компонентов: злаковое сено, кукурузный силос, сенаж и концентрированные корма. Для кормления животных также используются кормовая свекла, солома и свекловичный жом.

В пастбищный период рацион состоит из зеленых кормов с добавкой концентратов. К числу основных компонентов рациона в стойловый период относятся злаковое сено, кукурузный силос и сенаж, потребление которых определяет поступление радионуклидов в организм животного, а также концентраты. Для кормления животных может использоваться кормовая свекла и свекловичный жом, однако их вклад в поступление ¹³⁷Cs в молоко не значителен [21].

Пастбищный период (травяной рацион) в юго-западных районах Брянской области обычно начинается 26 апреля и длится 182 дня, при этом, на основе данных многолетних наблюдений, принималось, что 60% молока производится в пастбищный период и 40% в стойловый.

В случае равномерного загрязнения территории загрязнение молока в период содержания животных на силосном рационе (при прочих равных условиях) примерно в 2 раза меньше, чем в пастбищный период, то есть в период

Таблица 2

Типовые рационы кормления молочного скота, кг/сутки

[Table 2

Typical feeding rations for dairy cattle, kg/day]

Компоненты рациона [Ration components]	Рационы кормления молочных коров [Feed rations for dairy cows]			
	Травяной [Herbal]	Силосно-сенажный [Silage-Hay]	Смешанный [Mixed]	Силосный [Silage]
Стойловый период [Stall period]				
Злаковое сено [Cereal hay]	–	8	5	8
Кукурузный силос [Maize silage]	–	15	22	25
Сенаж [Haylage]	–	5	13	–
Солома [Straw]	–	3	3	–
Концентраты [Concentrate feed]	5	2,5	2,5	2
Пастбищный период [Grazing period]				
Зеленые корма [Green fodder]	40	–	–	–

применения травяного рациона. При смешанном рационе эти различия составляют 1,8 раза, а максимальные различия между загрязнением молока в стойловый и пастбищный периоды могут отмечаться при включении в состав «зимнего» рациона корнеплодов [21]. Это позволяет рассматривать варьирование составом рациона как одно из ветеринарных мероприятий, направленных на снижение загрязнения продукции животноводства [15]. Для производства кормов в юго-западных районах Брянской области использовались сельскохозяйственные угодья, отличающиеся по характеристикам почвы, плотности загрязнения и степени окультуривания. Важным фактором, влияющим на поступление радионуклидов в корма и, как следствие, в организм животного, были и защитные мероприятия в АПК.

Содержание ^{137}Cs в суточном стандартном рационе кормления животных (Q^j) при известной концентрации радионуклидов в кормах рассчитывается на основе стандартного выражения:

$$Q^j(t) = \sum_i^N \delta_i^j \times q_i(t) \quad (1)$$

где: δ_i^j - весовое количество кормов вида (i) в суточном рационе кормления животных (Q^j); $q_i(t)$ концентрация ^{137}Cs в i -м виде кормов. В этом случае содержание ^{137}Cs в молоке, соответствующее рациону j , можно оценить с помощью коэффициента перехода из суточного поступления в организм животного в молоко ($K_{\text{п}}^j$).

$$C^j = K_{\text{п}}^j \times Q^j \quad (2)$$

Результаты расчетов содержания ^{137}Cs в молоке при использовании рационов, приведенных в таблице 2 на протяжении 35 лет после Чернобыльской аварии на основе выражений (1) и (2), приведены на рис. 3.

Значение $K_{\text{п}}^j$, равное $9,2 \times 10^{-3}$ (Бк/кг)/(Бк/сутки), соответствует оценке геометрического среднего на основе данных, полученных в этом регионе после аварии на ЧАЭС [21], а содержание ^{137}Cs в кормах – на основе информации по динамике загрязнения кормов в этот период [24].

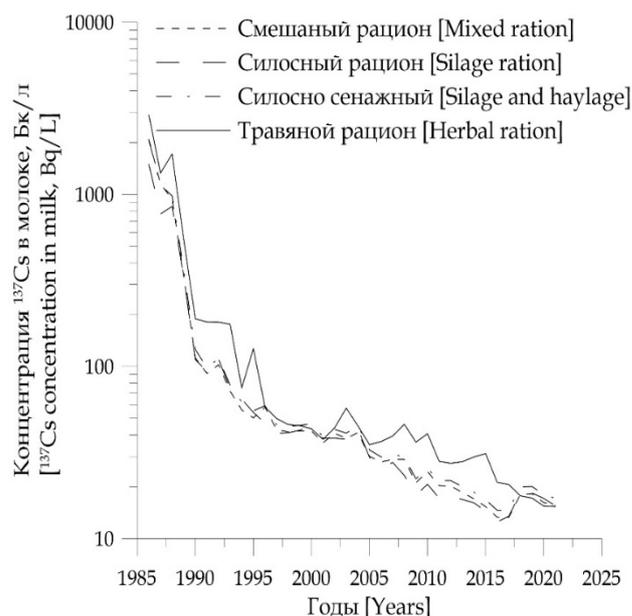


Рис. 3. Динамика содержания ^{137}Cs в молоке для различных рационов животных

[Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in milk corresponding different feeding rations]

Данные, представленные на рис. 3 и 4, показывают влияние рационов, используемых для кормления животных, на поступление ^{137}Cs в молоко. При этом динамика содержания ^{137}Cs в молоке, рассчитанного для рационов в стойловый период (рис. 3), значительно отличалась от динамики ^{137}Cs в молоке в пастбищный период (травяной рацион). В то же время различия между содержанием ^{137}Cs в молоке, рассчитанном для различных рационов стойлового периода, отличались менее значительно.

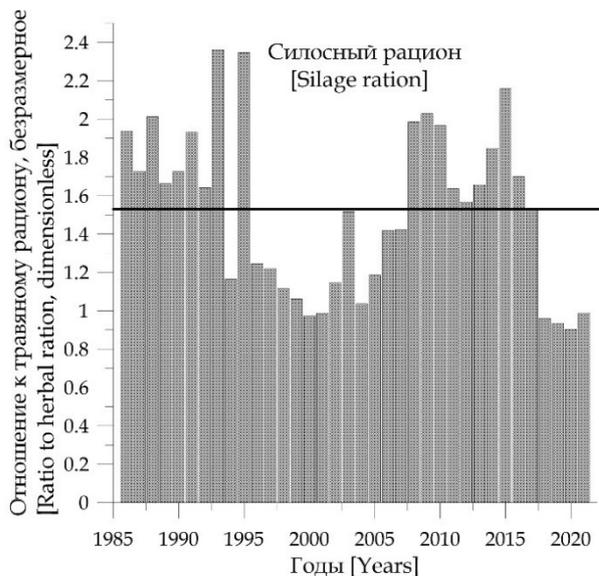
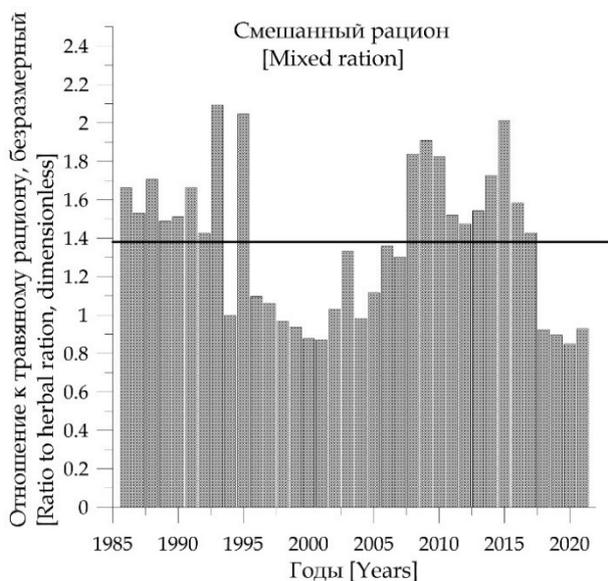


Рис. 4. Динамика отношений концентраций ^{137}Cs в молоке в стойловый период к молоку, производимому в пастбищный период (травяной рацион)

[Fig. 4. Dynamics of the ratios of the ^{137}Cs concentrations in the milk of winter period to those in the milk of the pasture period (herbal ration)]

Динамика содержания ^{137}Cs в кормах, производимых в юго-западных районах Брянской области в различные периоды после аварии на Чернобыльской АЭС, отличалась [24]. Вследствие экономических и технических условий организации кормопроизводства на загрязненных территориях состав кормов в рационе кормления животных также варьировал. Вследствие этого отношение между уровнями загрязнения молока в стойловый и пастбищный периоды также варьировало и отклонялось от отношения в случае, когда уровни загрязнения сельскохозяйственных угодий были близки.

На рис. 4 показана динамика расчётных отношений концентраций ^{137}Cs в молоке крупного рогатого скота в период стойлового содержания для смешанного и силосного рационов к концентрациям ^{137}Cs в молоке при содержании животных на травяном рационе.

Сплошная линия на рис. 4. показывает среднее значение за 35 лет, прошедших после аварии. Оценки, сделанные на основе выражений (1) – (2) и данных работы [24] по содержанию ^{137}Cs в кормах, показывают, что реальное отношение загрязнения молока в пастбищный период к загрязнению молока в стойловый период, учитывающее различия в загрязнении сельскохозяйственных угодий, проведение мероприятий и смену полей в рамках севооборота, для смешанного рациона находилось в диапазоне от 0,85 до 2,1 при среднем 1,48. Для силосного рациона эти значения составляли 0,9 и 2,4 при среднем 1,53.

Динамика концентрации ^{137}Cs в молоке в первый период после аварии

Данные по концентрациям ^{137}Cs в молоке в 1986–1991 годах, полученные при проведении мониторинга, приведены на рис. 5.

В первый период после аварии на Чернобыльской АЭС мониторинг продукции животноводства проводился на ограниченном числе хозяйств научными организациями и, в первую очередь, ВНИИРАЭ. Впоследствии эти данные

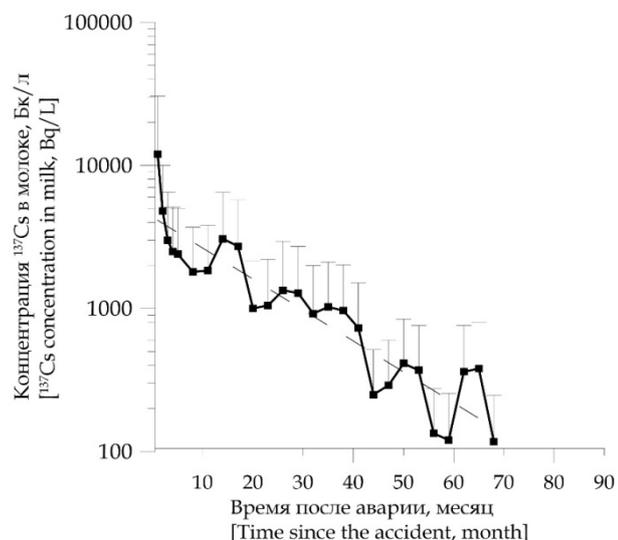


Рис. 5. Динамика концентраций ^{137}Cs в молоке крупного рогатого скота в первый период после Чернобыльской аварии, тренд показан пунктиром [27]

[Fig. 5. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in cattle milk in the first period after the Chernobyl accident, the exponential trend is shown by the dotted line [27]]

были обобщены и использовались для валидации биосферных моделей [27]. В 1986 году, в первый период после выпадений (май — август 1986 г.), усредненные по месяцам концентрации ^{137}Cs в молоке уменьшалась с периодом полуснижения примерно 30 дней. Эта оценка периода полуснижения существенно больше периодов, рассчитываемых на основе детальной посуточной динамики самоочищения растительности и снижения концентрации ^{137}Cs в молоке [28]. При переходе на стойловый рацион в 1986 г. отмечалась стабилизация концентраций радионуклида в молоке с последующим ростом концентраций в молоке в следующий пастбищный период. Период полуснижения средних по году концентраций ^{137}Cs в молоке составил для 1986–1991 гг. 0,6 лет ($R^2=0,84$).

Динамика среднегодовых уровней содержания ^{137}Cs в молоке: 1987–2014 годы

Мониторинг содержания радионуклидов в продукции животноводства проводился с 1987 до 2014 г. Концентрации ^{137}Cs в молоке, получаемом в общественном и частном секторе в этот период приведены на рис. 6. На этом рисунке наряду с данными измерений содержания ^{137}Cs в молоке приведены и результаты реконструкции загрязнения молока на основе рационов и концентраций ^{137}Cs в кормах [23–24]. Результаты оценок концентраций ^{137}Cs в молоке на основе загрязнения рациона в периоды времени, когда не применялись ФСП, в частности с 1987 до 1992 гг., и с 2009 до 2014 гг. довольно хорошо соответствуют данным измерений ^{137}Cs в молоке. В периоды времени, когда ферроцинсодержащие препараты использовались широко, содержание ^{137}Cs в молоке было, как правило, ниже данных, которые получены на основе содержания ^{137}Cs в рационе. В Новозыбковском районе, в котором эти препараты применялись с 1993 по 2009 год, данные измерений содержания ^{137}Cs в молоке систематически превышали оценки, полученные на основе рационов кормления животных. В Климовском районе, в котором ферроцинсодержащие препараты не применялись, средние уровни содержания ^{137}Cs в молоке уже после 1990 года были ниже 100 Бк/л. Ферроцинсодержащие препараты в этом районе не применялись, и расчетные и измеренные концентрации ^{137}Cs в молоке были довольно близки.

Можно выделить три периода времени, в течение которых динамика снижения ^{137}Cs в молоке отличалась. Первый период с 1987 до 1992 года, второй – 1993 по 2000 г. и третий с 2000 по 2014 г. В соответствии с этим были рассчитаны периоды полуснижения концентраций ^{137}Cs в молоке $T_{1/2}^I$, $T_{1/2}^II$ и $T_{1/2}^III$ (таблица 3). Интервал времени, в течение которого проводился отбор проб в Климовском районе, был короче, чем в других районах и ограничивался 2007 г.

Первый период охватывал промежуток времени, когда мероприятия применялись в максимальных масштабах. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в этот период определялась агротехническими и агрохимическими мероприятиями, а оценка загрязнения молока на основе рациона кормления животных была близка к данным измерений. Периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в молоке (от 1 до 2 лет), были несколько короче периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в кормах, что объясняется проведением ветеринарных мероприятий в первый период после аварии на Чернобыльской АЭС. Второй период включает промежуток времени, когда объемы проведения защитных меро-

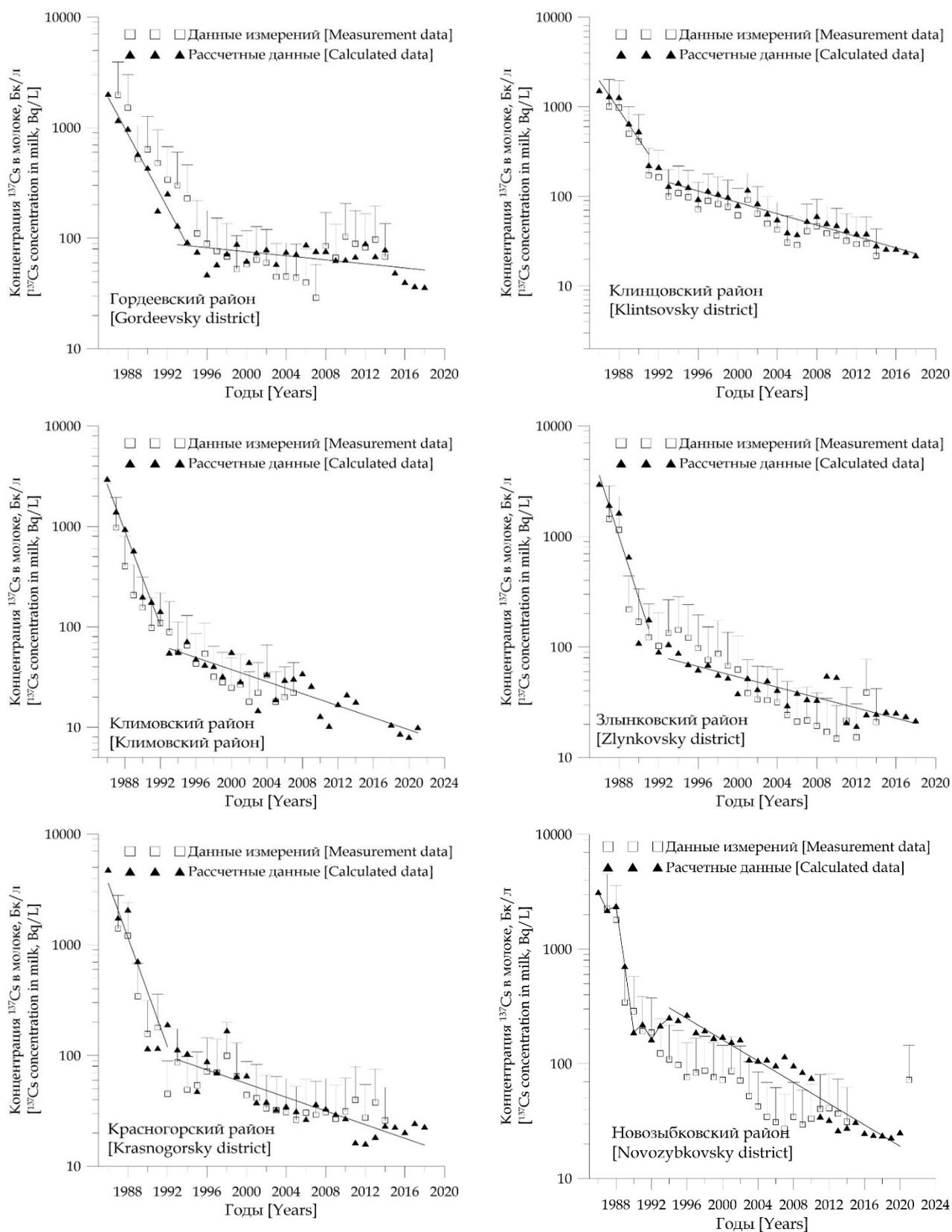


Рис. 6. Содержание ^{137}Cs в молоке в юго-западных районах Брянской области
 [Fig 6. ^{137}Cs concentrations in milk in southwestern districts of Bryansk region]

Таблица 3

Эффективные периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs в пробах молока, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1987–2014 годах

[Table 3]

Effective half-lives of ¹³⁷Cs concentrations in milk in the southwestern districts of the Bryansk region in 1987–2021]

Районы [Districts]	$T_{1/2}^1$, лет [years]	R^2	$T_{1/2}^2$, лет [years]	R^2	$T_{1/2}^3$, лет [years]	R^2
Гордеевский [Gordeevsky]	2,0	0,92	2,4	0,94	21	0,31
Злынковский [Zlunkovsky]	1,2	0,91	12	0,82	12	0,59
Климовский [Klimovsky]	1,5	0,92	4,1	0,89	23,1	0,14
Клинцовский [Klintsovsky]	1,6	0,92	9,9	0,88	10,5	0,71
Красногорский [Krasnogorsky]	1,0	0,88	24,0	0,05	25,0	0,42
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1,4	0,90	6,4	0,77	11,6	0,66

приятый агротехнических мероприятий сократились, а довольно низкие уровни загрязнения молока поддерживались за счет применения ферроцинсодержащих препаратов. Для этого периода оценки загрязнения молока на основе рациона кормления животных были ниже данных измерений. С 2000 г. начался третий период – период активного внедрения федеральных целевых программ и последствий от применения агротехнических реабилитационных мероприятий.

В районах с наибольшими уровнями загрязнения молока отмечены как более короткие периоды полуснижения, так и максимальные отличия измеренных уровней загрязнения молока от уровней загрязнения, оцененных на основе данных о загрязнении кормов. Периоды полуснижения с 1993 по 2000 гг. варьировали в широком диапазоне от 2,4 до 24 лет, а третьи от 10,5 года до более 25 лет. Средние по юго-западным районам периоды полуснижения составили 1,4, 9,8 и 17,2 года.

Динамика загрязнения молока в частном и коллективном секторе

При планировании защитных и реабилитационных мероприятий на загрязненных территориях изначально предполагалось, что содержание ¹³⁷Cs в «частном» молоке выше, чем в молоке, производимом в коллективном секторе. Во многих случаях это связано с тем, что корма для частных животных производились на угодьях более низкого качества. Данные, полученные в наших исследованиях, подтверждают это предположение (рис. 7). Превышение концентраций ¹³⁷Cs в молоке, получаемом в частном секторе над содержанием радионуклида в «общественном» молоке, носило систематический характер, хотя и было относительно невелико: от 20 до 80%. Среднее отношения концентраций ¹³⁷Cs в «частном» молоке к «коллективному» составило 1,3±0,25. Периоды полуснижения ¹³⁷Cs в молоке, производимом в частном и коллективном секторах, были близки и составили для периода 1990–2000 гг. 8,0 и 8,3 года, а для 2000–2014 гг. – 21 и 27 лет. Это показывает, что мероприятия, проводимые в частных и общественных хозяйствах, имели близкую эффективность.

Сравнение с данными других исследований

Полученные данные в целом находятся в согласии с данными других исследований (таблица 4), существенно их дополняя. Ряды данных, полученных в Российской

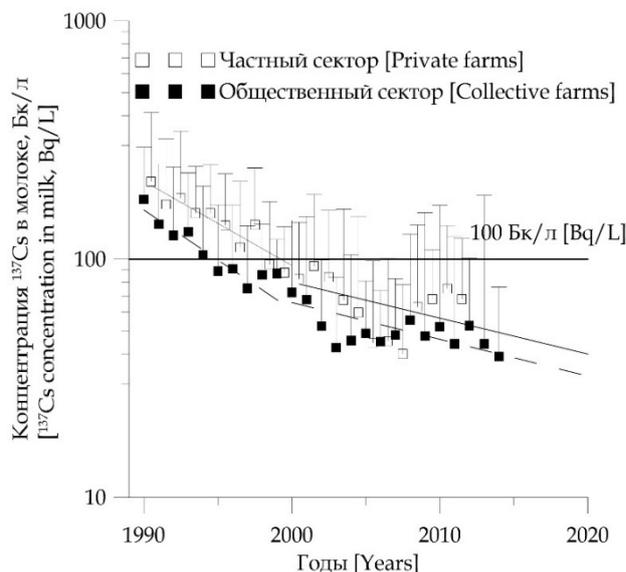


Рис. 7. Динамика концентраций ¹³⁷Cs в молоке, производимом в частных и коллективных хозяйствах юго-западных районов Брянской области [Fig. 7. Dynamics of ¹³⁷Cs concentrations in milk produced in private and collective farms in the southwestern districts of Bryansk region]

Федерации, существенно длиннее периодов и объемов мониторинга в других странах.

В работе [32] представлен обзор данных по снижению содержания ¹³⁷Cs в молоке в районах Дании, Германии и Австрии, которые охватывают период времени, начиная с 1965 года. В то же время эти данные не позволяют в полной мере провести прямое сравнение с нашими оценками, поскольку первые годы после выпадений из оценки периодов полуснижения были исключены.

Периоды полуснижения с 1989 до 1999 гг. в регионах Европы, где вклад чернобыльской компоненты был значителен, находятся в диапазоне от 5,2 до 9,5 лет и достаточно хорошо согласуются с данными, приведёнными в настоящей статье для аналогичного периода.

В Австрии на основе данных мониторинга с 1987 по 1993 гг., был оценен период полуснижения для молока рав-

Периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в молоке (литературные данные)

[Table 4

Half-lives of ^{137}Cs in milk (based on literature data)]							
Место отбора [Sampling region]	Годы [Years]	$T^{1/2}$, лет [years]	R^2	Годы [Years]	$T^{2/2}$, лет [years]	R^2	Ссылки [ref.]
Брянская область [Bryansk region]	1987–1990	0,8–1,3	0,89	1990–1992	2,6–4,3	0,54	[13]
Калужская область [Kaluga region]	1987–1990	1,1–1,8	–	1990–1992	5,7–11,7	–	[13]
Тульская, Орловская [Tula/Orel region]	1987–1990	2,1–2,4	0,66	–	–	–	[31]
Австрия [Austria]	1987–1993	1,4±0,3	–	–	–	–	[32]
Бавария [Bavaria]	1969–1985	4,5	90,5	1989–1999	5,9	95,3	[32]
Баден–Вюртенберг [Baden-Württemberg]	1969–1985	3,2	86,1	1989–1999	9,1	90,6	[32]
Северный Рейн Вестфалия [North Rhine Westphalia]	1969–1985	7,2	91,7	1989–1999	9,5	85,5	[32]
Нижняя Саксония [Lower Saxony]	1969–1985	6,1	91,5	1989–1999	5,2	83,4	[32]
Дания [Denmark]	1967–1985	6,9	–	–	–	–	[32]

ный $1,94 \pm 0,32$ года [33], что входит в диапазон оценок, полученных для районов Российской Федерации. В этих работах также отмечено, что экологические периоды полуснижения радиоцезия в молоке варьировали в зависимости от 1 до 4 лет в первые 5–6 лет после выпадения, после чего наступило более медленное снижение с экологическим периодом полуснижения между 5 и 15 годами [33]. Аналогичные выводы сделаны в работе [34], в которой также отмечено увеличение экологического периода полуснижения ^{137}Cs в молоке от около 1.0 года течение первых лет после Чернобыльской аварии до 20–30 лет в последующие годы.

Периоды полуснижения, рассчитанные для 2000–2008 гг., варьируют от 10,5 до 25 лет при среднем значении 17,4 года. Учитывая хорошее согласие между оценками, полученными на основе измерений и расчетов, сделанных с помощью данных о содержании ^{137}Cs в кормах (периоды полуснижения для 2015–2021 гг. находятся в диапазоне 18–27 лет), можно сделать вывод о том, что оценка, близкая к верхнему пределу варьирования этого параметра может консервативно использоваться для анализа возможности перехода загрязненных районов к условиям нормальной жизнедеятельности.

Заключение

Анализ данных по закономерностям изменения содержания ^{137}Cs в молоке, производимом в юго–западных районах Брянской области, подтверждает выводы, сделанные при изучении закономерностей накопления этого радионуклида в продукции растениеводства и кормопроизводства, представленные в наших предыдущих публикациях [23, 24]. Динамика содержания радиоцезия в молоке после аварии на Чернобыльской АЭС во многом зависела от осо-

бенностей проведения агротехнических и агрохимических реабилитационных мероприятий, включая применение ферроцинсодержащих препаратов и достаточно хорошо согласуется с данными по содержанию этого радионуклида в кормах. Первые периоды полуснижения с 1987 по 1993 годы находились в диапазоне от 1 до 2 лет, вторые периоды от 4,4 до 24 лет и третьи от 10,5 до 25 лет. Периоды полуснижения, рассчитанные для сельскохозяйственных предприятий различных районов отличались, что необходимо учитывать при определении стратегии перехода этих районов к нормальным условиям жизнедеятельности.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Фесенко С.В. – разработка концепции исследования; анализ и интерпретация данных; написание текста статьи или ее редактирование; утверждение окончательного варианта статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов.

Исамов Н.Н. – сбор, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая решение вопросов, связанных с точностью любой части работы

Емлютина Е.С. – обработка и анализ данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Карпенко Е.И. – анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Горяинов В.А. – сбор и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Благодарности

Данные исследования выполнены в рамках фундаментальных и прикладных исследований по Программе деятельности федерального государственного бюджетного учреждения "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" на 2023–2027 годы (комплексная тема 5П.7. «Прикладные генетические и биотехнологические исследования для сельского хозяйства»). Авторы выражают свою признательность рецензентам за тщательное прочтение рукописи и ценные замечания.

Информация о конфликте интересов

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

Литература

1. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография / Под ред. Санжаровой Н.И. и Фесенко С.В. М.: РАН, 2018. 278 с.
2. Финогенов А.А., Ткачев В.А., Локшин А.М. и др. Российский Национальный Доклад: 35 лет чернобыльской аварии. итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986–2021. М.: ИБРАЭ, 2021. 116 с.
3. Алексахин Р.М., Крышев И.И., Санжарова Н.И. и др. Радиоэкологические последствия Чернобыльской аварии: Монография / под ред. Крышева И.И. ЯО СССР, сер. Радиоэкологические аспекты ядерной энергетики. М.: 1991. 190 с.
4. Алексахин Р.М., Козьмин Г.В., Санжарова Н.И., Фесенко С.В. О реабилитации территорий, подвергшихся загрязнению // Вестник РАСХН. 1994. № 2. С. 28–30.
5. Алексахин Р.М., Корнеев Н.А., Герасимов С.А. и др. Итоги исследований по радиобиологии и радиоэкологии во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38, № 2. С. 293–302.
6. Алексахин Р.М., Крышев И.И., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. Радиоэкологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. 1990. Т. 68, № 6. С. 320–328.
7. Панов А.В., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. Влияние сельскохозяйственных контрмер на облучение населения территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2006. Т. 46, № 2. С. 273–279.
8. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Алексахин Р.М. и др. Оценка факторов, определяющих динамику загрязнения ¹³⁷Cs сельскохозяйственной продукции после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, № 3. С. 307–315.
9. Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Спиридонов С.И. и др. Закономерности изменения содержания ¹³⁷Cs в продукции животноводства на территории Российской Федерации, подвергшейся загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, № 3. С. 316–326.
10. Fesenko S.V., Jacob P., Alexakhin R. et al. Important factors governing exposure of the population and countermeasure application in rural settlements of the Russian Federation in the long term after the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity. 2001. Vol. 56. P. 77–98.
11. Jacob P., Fesenko S., Firsakova S.K. et al. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity. 2001. Vol. 56. P. 51–76.
12. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // Radiation Protection Dosimetry. 1996. Vol. 64. P. 37–42.
13. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I. et al. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant // Radiation Protection Dosimetry. 1995. Vol. 60(2). P. 155–166.
14. Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Fesenko S.V. et al. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts // Health Physics. 2007. Vol. 93(5). P. 418–426.
15. Исамов Н.Н. (мл.), Сироткин А.Н., Фесенко С.В. и др. Закономерности миграции техногенных загрязнителей в трофической цепи лактирующих коров // Экология. 1998. № 6. С. 441–446.
16. Алексахин Р.М., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. О снижении содержания ¹³⁷Cs в продукции растениеводства, подвергшейся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС // Доклады РАСХН. 1995. № 3. С. 20–21.
17. Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N. et al. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in fodder in the long term after the Chernobyl accident // Biology Bulletin. 2022. Vol. 49(12). P. 153–162.
18. Методы и средства радиационного контроля / Под ред. А.А. Курганова, В.Н. Мошарова. Министерство сельского хозяйства. М.: 1995. 178 с.
19. Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Karpenko Ye.I. et al. Radioecological monitoring and its role in ensuring the safety of nuclear power plants // Nuclear Energy and Technology. 2022. Vol. 8(1). P. 43–48.
20. Balonov M., Kashparov V., Nikolaenko A. et al. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38. P. 854–867.
21. Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Прудников П.В., Емлютина Е.С. Радиоэкологическое обоснование контрольных уровней содержания ¹³⁷Cs в кормах сельскохозяйственных животных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61, № 6. С. 652–663.
22. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Романович И.К. и др. Радиологические аспекты возвращения территорий Российской Федерации, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 2. С. 322–335.
23. Фесенко С.В., Прудников П.В., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 45–57.
24. Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н. и др. Динамика содержания ¹³⁷Cs в кормах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // Радиационная Гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 104–119.
25. Герасимова Н.В., Марченко Т.А., Онищенко Г.Г. и др. 20 лет Чернобыльской катастрофы. Итоги и проблемы ее преодоления в России. 1986–2006. Российский национальный доклад. М.: ИБРАЭ. 2006. 92 с.
26. Герасимкин С.А., Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И. Статистические методы анализа эмпирических распределений коэффициентов накопления радионуклидов растениями // Сельскохозяйственная биология. 1991. № 1. С. 130–137.

27. Thiessen K.M., Sazykina T.G., Apostoaei A.I. et al. Model testing using data on ^{137}Cs from Chernobyl fallout in the Iput River catchment area of Russia // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005. 84(2). P. 225–244.
28. Fesenko S., Shinano T., Onda Y., Dercon G. Dynamics of radionuclide activity concentrations in weed leaves, crops and of air dose rate after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 222. 106347.
29. Fesenko S., Howard B.J., Isamov N. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 2. Transfer to milk // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007. Vol. 98. P. 104–136.
30. Tagami K., Hashimoto S., Kusakabe M. et al. Pre- and post-accident environmental transfer of radionuclides in Japan: lessons learned in the IAEA MODARIA II programme // *Journal of Radiological Protection*. 2022. Vol. 42, № 2. P. 020509.
31. Fesenko S.V., Colgan P.A., Lissianski K.B. et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and doses resulting from the consumption of milk and milk products // *Radiation Protection Dosimetry*. 1997. 69 (4). P. 289–299.
32. Pröhl G., Ehken S., Fiedler I. et al. Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 91, No. 1–2. P. 41–72.
33. Muck K. Long-term effective decrease of caesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout // *Health Physics*. 1997. Vol. 72. P. 659–673.
34. Smith J.T., Fesenko S.V., Howard B.J. et al. Temporal change in fallout ^{137}Cs in terrestrial and aquatic systems: a whole ecosystem approach // *Environmental Science and Technology*. 1999. Vol. 33. P. 49–54.

Поступила: 29.03.2024

Фесенко Сергей Викторович – главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». **Адрес для переписки:** 249032, Россия, Калужская область, Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Исамов Низаметдин Низаметдинович – заведующий лабораторией Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

Емлютина Евгения Сергеевна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

Карпенко Евгений Игоревич – директор Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

Горяинов Вадим Анатольевич – заместитель директора департамента сельского хозяйства Брянской области, Брянск, Россия

Для цитирования: Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Емлютина Е.С., Карпенко Е.И., Горяинов В.А. Динамика содержания ^{137}Cs в молоке сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 3. С. 16–28. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-16-28

Dynamics of ^{137}Cs concentrations in cow milk in the districts of Bryansk region

Sergey V. Fesenko¹, Nizametdin N. Isamov¹, Evgeniya S. Emlyutina¹, Evgeny I. Karpenko¹, Vadim A. Goryainov²

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia

²Bryansk Administration, Bryansk Region, Bryansk, Russia

The publication continues the series of research addressed to the dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident. The purpose of the present paper was to analyze the data describing the changes of ^{137}Cs concentrations in cow milk. The information on countermeasures in animal breeding is presented, the system of radiological monitoring of milk contamination is described. It is shown that the dynamics of ^{137}Cs concentrations in milk was seriously affected by the implementation of agrotechnical and veterinary measures. Effective half-lives of ^{137}Cs concentrations in milk in the first period after the accident (1987–1992) ranged from 1 to 2.0 years. In the subsequent period (1991–2015), the reduction of milk contamination slowed down and the half-lives ranged from 5 to 25 years depending on the scope of remediation works and ^{137}Cs aging in the soil.

Key words: Chernobyl NPP, agroindustrial production, milk of farm animals, southwestern districts of Bryansk region.

Sergey V. Fesenko

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»

Address for correspondence: Kievskoye shosse, 1, bldg. 1, Kaluga Region, Obninsk, 249035, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Authors' personal contribution

Sergey V. Fesenko – development of research concept; analysis and interpretation of data; writing or editing of the paper; approval of the final version of the paper for publication; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Nizametdin N. Isamov – data collection, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Evgeniya S. Emylutina – data processing, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Evgeny I. Karpenko – data analysis and interpretation; agree to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of the work.

Vadim A. Goryainov - data collection and interpretation; agree to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of the work.

Acknowledgments

These studies were carried out within the framework of fundamental and applied research on the Program of activities of The National Research Center «Kurchatov Institute» for 2023–2027 (project 5P.7. "Applied genetic and biotechnological research for agriculture"). The authors also express their gratitude to the reviewers for careful reading of the manuscript and valuable comments.

Conflict of interests

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

References

- Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas: Monograph Edited by Sanzharova NI and Fesenko SV. Moscow: RAS; 2018. 278 p. Available from: <https://rira.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g>. (Accessed: January 22, 2023) (In Russian).
- Finogenov AA, Tkachev VA, Lokshin AM, Asmolov VG, Verpeta VI, Kuzmin SV, et al. Russian National Report: 35 years of the Chernobyl accident. results and prospects of overcoming its consequences in Russia. 1986–2021. Moscow: IBRAE; 2021. 116 p. (In Russian).
- Alexakhin RM, Kryshev II, Sanzharova NI, Fesenko SV. Radioecological consequences of the Chernobyl accident. Moscow: NS of the USSR; 1991. 190 p. (In Russian).
- Alexakhin RM, Kozmin GV, Sanzharova NI, Fesenko SV. On rehabilitation of territories subjected to contamination. *Vestnik RASKHN = Vestnik RASKHN*. 1994;2: 28–30. (In Russian).
- Alexakhin RM, Korneev NA, Geraskin SA, Sanzharova NI, Fesenko SV, Panov AV, et al. Results of research on radiobiology and radioecology at the All-Russian Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1998;38(2): 293–302. (In Russian).
- Alexakhin RM, Kryshev II, Fesenko SV, Sanzharova NI. Radioecological problems of nuclear power engineering. *Atomnaya energiya. = Atomic Energy*. 1990;68(6): 320–328. (In Russian).
- Panov AV, Fesenko SV, Sanzharova NI, Aleksakhin RM, Prudnikov PV, Pasternak AD, et al. Influence of agricultural countermeasures on the population exposure in the territories affected by the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2006;46(2): 273–279. (In Russian).
- Sanzharova NI, Fesenko SV, Alexakhin RM, Abramova TN, Kuznetsov VK. Evaluation of the factors determining the dynamics of ¹³⁷Cs contamination of agricultural products after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1995; 35(3): 307–315. (In Russian).
- Fesenko SV, Alexakhin RM, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Kolmykov MV. Regularities of changes in the ¹³⁷Cs content in animal products. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1995; 35(3). 316–327. (In Russian).
- Fesenko SV, Jacob P, Alexakhin R, Sanzharova NI, Panov A, Fesenko G, et al. Important factors governing exposure of the population and countermeasure application in rural settlements of the Russian Federation in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;56: 77–98.
- Jacob P, Fesenko S, Firsakova SK, Likhtarev IA, Schotola C, Alexakhin RM, et al. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;56: 51–76.
- Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996;64: 37–42.
- Fesenko SV, Alexakhin RM, Sanzharova NI, Spiridonov SI. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;60(2): 155–166.
- Alexakhin RM, Sanzharova NI, Fesenko SV, Spiridonov SI, Panov AV. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts. *Health Physics*. 2007 93(5): 418–426.
- Isamov NN (Jr.), Sirotkin AN, Fesenko SV, Sokolova EA, Sidorova EV. Regularities of migration of anthropogenic pollutants in the trophic chain of lactating cows. *Ekologiya = Ecology*. 1998;6: 441–446. (In Russian).
- Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI, Spiridonov SI, Vorobyev GT, Yakovleva NA. On the reduction of ¹³⁷Cs concentrations in crops contaminated after the Chernobyl accident. *Doklady RASKHN = Doklady RASKHN*. 1995;3: 20–21. (In Russian).
- Fesenko SV, Prudnikov PV, Isamov NN, Emylutina ES, Titov IE. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in fodder in the long term after the Chernobyl accident. *Biology Bulletin*. 2022; 49(12): 153–162.
- Methods and tools for radiation control (collection of materials). Kurganov AA and Mosharov VN. Editors. Moscow: Ministry of Agriculture; 1995. 178 p. (In Russian).
- Fesenko SV, Sanzharova NI, Karpenko YeI, Isamov NN, Kuznetsov VK, Panov AV, et al. Radioecological monitoring and its role in ensuring the safety of nuclear power plants. *Nuclear Energy and Technology*. 2022; 8(1): 43–48.
- Balonov M, Kashparov V, Nikolaenko A, Berkovskyy V, Fesenko S. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38: 854–867.
- Fesenko SV, Isamov NN, Prudnikov PV, Emylutina ES. Radioecological substantiation of the control levels of ¹³⁷Cs con-

- centrations in the fodder of farm animals. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. = Radiation Biology. Radioecology.* 2021;61(6): 652–663. (In Russian).
22. Sanzharova NI, Fesenko SV, Romanovich IK, Marchenko TA, Razdayvodin AN, Panov AV, et al. Radiological aspects of the return of the territories of the Russian Federation, affected by the Chernobyl NPP accident, to the conditions of normal life activity. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. = Radiation Biology. Radioecology.* 2016;56(2): 322–335. (In Russian).
 23. Fesenko SV, Prudnikov PV, Emlyutina ES, Epifanova IE, Shubina OA. Dynamics of ¹³⁷Cs concentrations in agricultural products of Bryansk region after the Chernobyl accident: grain, potatoes and vegetables. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene.* 2022;15(4): 45–57. (In Russian).
 24. Fesenko SV, Prudnikov PV, Isamov NN, Emlyutina ES, Epifanova IE, Shubina OA. Dynamics of ¹³⁷Cs concentrations in the fodder of farm animals in the districts of Bryansk region affected after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene.* 2023;16(1): 104–119. (In Russian).
 25. Gerasimova NV, Marchenko TA, Onishchenko GG, Perminova GS, Chelyukanov V, Agapov AM. 20 years of the Chernobyl catastrophe. results and problems of its overcoming in Russia. 1986–2006. Russian National Report. Moscow: IBRAE; 2006. 92 p. (In Russian).
 26. Geraskin SA, Fesenko SV, Chernyaeva LG, Sanzharova NI. Statistical methods of analyzing empirical distributions of radionuclide accumulation coefficients by plants. *Selskokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology.* 1991; (1): 130–137. (In Russian).
 27. Thiessen KM, Sazykina TG, Apostoaei AI, Balonov MI, Crawford J, Domel R, et al. Model testing using data on ¹³⁷Cs from Chernobyl fallout in the Iput River catchment area of Russia. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2005;84(2): 225–244.
 28. Fesenko S, Shinano T, Onda Y, Dercon G. Dynamics of radionuclide activity concentrations in weed leaves, crops and of air dose rate after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2020;222: 106347.
 29. Fesenko S, Howard BJ, Isamov N, Voigt G, Beresford NA, Sanzharova N, et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 2. Transfer to milk. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2007;98: 104–136.
 30. Tagami K, Hashimoto S, Kusakabe M, Onda Y, Howard B, Fesenko S, et al. Pre- and post-accident environmental transfer of radionuclides in Japan: lessons learned in the IAEA MODARIA II programme. *Journal of Radiological Protection.* 2022;42(2): 020509
 31. Fesenko SV, Colgan PA, Lissianski KB, Vazquez C, Guardans R. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and doses resulting from the consumption of milk and milk products. *Radiation Protection Dosimetry.* 1997;69 (4): 289–299.
 32. Pröhl G, Ehlken S, Fiedler I, Kirchner G, Klemm E, Zibold G. Ecological half-lives of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2006;91(1–2): 41–72.
 33. Muck K. Long-term effective decrease of caesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout. *Health Physics.* 1997;72: 659–673.
 34. Smith JT, Fesenko SV, Howard BJ, Horrill D, Sanzharova N, Alexakhin R, et al. Temporal change in fallout ¹³⁷Cs in terrestrial and aquatic systems: a whole ecosystem approach. *Environmental Science and Technology.* 1999;33: 49–54.

Received: March 29, 2024

For correspondence: Sergey V. Fesenko – Chief Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute» (Kievskoye shosse, 1, bldg. 1, Kaluga Region, Obninsk, 249035, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru)

Nizametdin N. Isamov – Head of Laboratory, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia

Evgeniya S. Emlyutina – Researcher. Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia

Evgeny I. Karpenko – Director, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia

Vadim A. Goryainov – Deputy Director of the Department of Agriculture of Bryansk region, Bryansk, Russia

For citation: Fesenko S.V., Isamov N.N., Emlyutina E.S., Karpenko E.I., Goryainov V.A. Dynamics of ¹³⁷Cs concentrations in cow milk in the districts of Bryansk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2024. Vol. 17, No. 3. P. 16-28. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-16-28

Проблемы обращения с биологическими отходами пациентов в радионуклидной диагностике

Л.А. Чипига^{1,2,3,4}, С.А. Рыжов^{4,5,6}, А.В. Водоватов^{1,7}, И.А. Звонова¹, А.В. Петрякова^{1,8},
А.А. Станжевский², К.Д. Киселев^{5,9}, И.В. Глотова^{5,9}

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 Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Россия

⁵ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

⁶ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

⁷ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

⁸ Городская больница №40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

⁹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Министерство образования и науки Российской Федерации, Москва, Россия

Образующиеся при проведении радионуклидной диагностики биологические отходы (моча) пациентов, содержащие радионуклиды, как правило, поступают непосредственно в систему водоотведения медицинской организации. Установление новых критериев отнесения жидких отходов к радиоактивным согласно постановлению Правительства от 19.10.2012 № 1069 может повлечь за собой внесение изменений в нормативные документы, выдвигающие требования к организации работы отделений радионуклидной диагностики. К таким требованиям можно отнести обязательную организацию системы спецканализации. Данное требование может повысить стоимость процедуры радионуклидной диагностики, что, в свою очередь, повлияет на ее доступность для пациентов. Целью настоящей работы являлась оценка активностей радионуклидов в моче пациентов после радионуклидной диагностики и удельной активности в сточных водах медицинской организации и в баках биотуалетов в транспорте для определения путей обращения с такими отходами. На основании опубликованных литературных данных были определены параметры модели биологического выведения для следующих радиофармпрепаратов: ^{99m}Tc-пирофосфат, ⁶⁴Si-моноклональные антитела, ¹⁸F-ФДГ, ⁶⁸Ga-ПСМА-617. Были рассчитаны активности радионуклидов в моче пациентов, выводимой в медицинской организации и в общественном транспорте при перемещении пациента до места проживания после диагностической процедуры. Рассмотрены различные сценарии перемещения пациента. Получены величины выводимой активности, удельной активности и мощности дозы на расстоянии 1 м от бака биотуалета с отходами пациента для разных видов транспорта. Установлено, что при различных сценариях передвижения пациента рассчитанные значения удельной активности радионуклидов в баках биотуалетов превышает критерий отнесения жидких отходов к радиоактивным (вплоть до 180 раз для ⁶⁸Ga-ПСМА-617 при перемещении на автобусе). Таким образом, в соответствии с нормативными требованиями необходим сбор и выдержка биологических отходов от пациентов после радионуклидных диагностических исследований на распад. Однако оценочные расчеты показали, что эффективные дозы у лиц из населения от контакта с такими отходами не превышают допустимых значений. Это объясняется коротким периодом полураспада диагностических радионуклидов. В связи с чем предложены пути обращения с жидкими отходами пациентов после диагностических процедур без системы спецканализации.

Ключевые слова: радионуклидная диагностика, биологические отходы пациентов, облучение населения, критерии отнесения к жидким радиоактивным отходам, радиационная безопасность.

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

Введение

В связи с внесением изменений от 29 октября 2022 года в Постановление правительства №1069¹ и установлением критериев отнесения к жидким радиоактивным отходам (ЖРО), для ряда радионуклидов, применяемых в радионуклидной диагностике (РНД), вновь становится актуальным вопрос обращения с отходами пациентов в отделениях радионуклидной диагностики и позитронной эмиссионной томографии. В отличие от радионуклидной терапии, согласно отечественным нормативно-методическим документам² и международным рекомендациям [1], в отделениях радионуклидной диагностики не требуется организация специализированных систем для сбора и выдержки биологических отходов пациентов (моча) на распад. В предыдущих работах авторы обосновали возможность применения дифференцированного, в зависимости от применяемых радионуклидов, подхода к обращению с биологическими отходами пациентов в подразделениях ядерной медицины [2, 3].

Принятые изменения в Постановление правительства № 1069 и установление критериев отнесения к ЖРО для короткоживущих радионуклидов, применяемых в диагностике, могут потребовать внесения соответствующих требований в нормативные документы.

Цель исследования – оценка активностей радионуклидов в моче пациентов после РНД и удельной активности в сточных водах медицинской организации и в баках биотуалетов в транспорте для определения путей обращения с такими отходами.

Материалы и методы

Большинство диагностических радионуклидов выводятся с мочой. Степень экскреции и период полувыведения зависят не только от введенного РФЛП, но и от большого количества индивидуальных факторов, таких как состояние мочевыделительной системы, наличие общих заболеваний, возраст и пол пациента и т.д. Тем не менее в большинстве случаев до 60% от введенной активности выводятся в первые сутки, а максимальная активность в зависимости от РФЛП выводится в первые 4-6 часов после введения. При этом до 80% от введенной активности выводится в неизменном или частично не измененном виде. Для целей данной работы было принято, что порция мочи составляет 200 мл [4], а объем бака унитаза составляет 5,8 л. Вводимые активности РФЛП могут зависеть от массы пациента и приняты исходя из научных публикаций как максимальное из средних значений, рекомендованных для стандартного человека (таблица 1). Отдельно был рассмотрен вопрос естественного разбавления образующихся ЖРО другими сточными водами медицинской организации. Плотность образующихся ЖРО принята равной 1 г/мл.

Выведение РФЛП за время $\Delta t = (t_{l-1} - t_l)$ после введения РФЛП определяли по формуле (1) [5]:

$$A_{\text{вывед},l}(\Delta t) = A(t_{l-1}) - A(t_l) = A_0 \cdot \left[\sum_{i=1}^n a_i \exp(-\lambda_{\text{eff}i} \cdot t_{l-1}) - \sum_{i=1}^n a_i \exp(-\lambda_{\text{eff}i} \cdot t_l) \right], \quad (1)$$

где A_0 – вводимая пациенту активность радионуклида в РФЛП, Бк;

a_i – фракция выведения i -фазы РФЛП из организма пациента, отн. ед.;

$\lambda_{\text{eff}i}$ – константа эффективного выведения i -фазы РФЛП, сут⁻¹.

Накопление активности радионуклидов в биологических отходах (моче) пациента определяли с учетом добавки активности от новой микции и радиоактивного распада предыдущих выделений) по формуле (2):

$$A_{\text{отход}}(t_l) = A_{\text{вывед},l}(\Delta t) + A_{\text{отход}}(t_{l-1}) \cdot \exp\left(-\ln 2 \cdot (t_l - t_{l-1}) / T_{\text{phys}}\right) \quad (2)$$

Параметры модели (формула 1) выведения РФЛП из организма пациентов определяли на основании опубликованных литературных данных [6-9]. Параметры из формул 1 и 2 представлены в таблице 1.

Динамика изменения активности радионуклидов, образующихся в отходах пациента с течением времени согласно модели биовыведения представлена на рисунке 1.

Активности радионуклидов в сточных водах, образующихся за время пребывания пациентов в медицинской организации, а также в транспорте представлены в таблицах 2 и 3.

Оценка выведения радионуклидов в медицинской организации показала, что средняя удельная активность в моче, например, для пациента после введения ¹⁸F-ФДГ составит 0,68 МБк/г, удельная активность после смывания микции в унитаз – 23 кБк/г, что существенно выше предельного значения отнесения отходов к ЖРО (10 Бк/г). При объеме сети стоков медицинской организации более 17 м³ средняя удельная активность сточных вод не будет превышать предельное значение. Помимо этого, следует учитывать, что за 24 часа активность ¹⁸F снизится в 8025 раз (до 0,02 МБк), таким образом удельная активность будет ниже предельного значения и указанные стоки не будут классифицироваться как радиоактивные отходы.

Оценки активностей радионуклидов в сточных водах, образующихся в транспорте от пациента после РНД, удельная активность сточных вод в баках биотуалетов в транспорте, а также оценки мощности дозы от баков со сточными водами биотуалетов, представлены в таблице 3.

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 г. № 1929 «Изменения, которые вносятся в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069» [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1929 of October 29, 2022 «Changes to be made to the Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1069 of October 19, 2012» (In Russ.)]. (Далее – постановление Правительства № 1929).

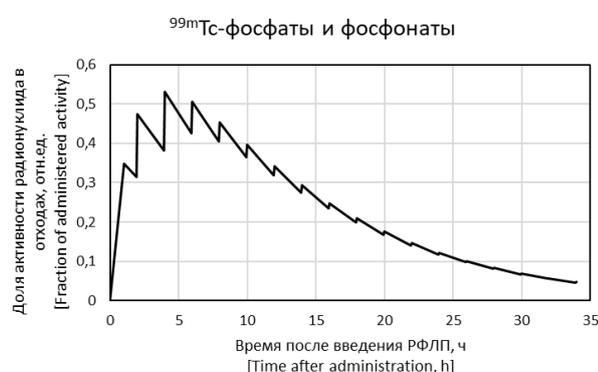
² СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии», утвержден Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 20 июля 2015 г. № 31 [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.3288-15 «Hygienic requirements for radiation safety during the preparation and the conduction of positron emission tomography» (In Russ.)] (далее – СанПиН 2.6.1.3288-15).

Параметры из формул 1 и 2

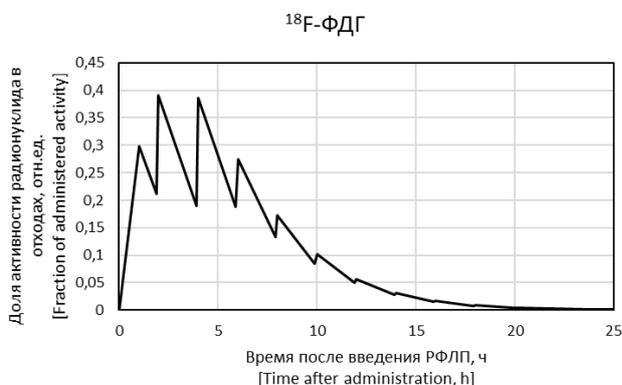
[Table 1

Parameters of equations 1 and 2]

РФЛП [Radiopharmaceutical]	A_0 , МБк [MBq]	T_{phys}	Параметр [Parameter]					
			a_1	$\lambda_{eff 1}$, сут ⁻¹ [day ⁻¹]	a_2	$\lambda_{eff 2}$, сут ⁻¹ [day ⁻¹]	a_3	$\lambda_{eff 3}$, сут ⁻¹ [day ⁻¹]
^{99m} Tc-пирофосфат [5] [^{99m} Tc-pyrophosphate]	700	6 ч [h]	0,3	36,2	0,3	11,2	0,4	3,0
⁶⁴ Cu-моноклональные антитела [5] [⁶⁴ Cu-monoclonal antibodies]	120	12,7 ч [h]	0,5	2,0	0,5	1,5	-	-
¹⁸ F-ФДГ [7,8] [¹⁸ F-FDG]	350	110 мин [min]	0,19	64,5	0,06	10,9	0,75	9,1
⁶⁸ Ga-ПСМА-617 [9] [⁶⁸ Ga-PSMA-617]	150	68 мин [min]	0,72	24,4	0,28	15,0	-	-



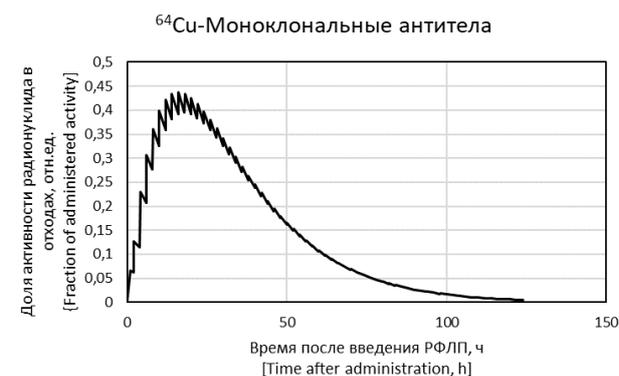
а



б



в



г

Рис. 1. Накопление активности радионуклидов в биологических отходах (моче) пациента (при микции через каждый час в первые 2 часа после введения РФЛП и дальше каждые 2 часа) с течением времени после введения РФЛП для: а – ^{99m}Tc-фосфаты и фосфонаты; б – ¹⁸F-ФДГ; в – ⁶⁸Ga-ПСМА-617, г – ⁶⁴Cu-моноклональные антитела [Fig. 1. Radionuclide activity in biological waste of (urination every 1 hour during first 2 hours and then every 2 hours) with time after administration of radiopharmaceutical for: а – ^{99m}Tc-labeled phosphate and phosphonate agents; б – ¹⁸F-FDG; в – ⁶⁸Ga-PSMA-617, г – ⁶⁴Cu-monoclonal antibodies]

Таблица 2

Активности радионуклидов в сточных водах, образующиеся за время пребывания пациентов в медицинской организации (в расчете на одного пациента)

[Table 2]

Accumulation of radionuclide activity generated in the sewage water in the hospital (per 1 patient)

РФЛП [Radiopharmaceutical]	Время нахождения в МО, ч [Time in the hospital, h]	Активность в сточных водах, МБк (% от введенной) с учетом распада [Activity in the sewage water, MBq (% of the administered activity)]
^{99m} Tc-пирофосфат [^{99m} Tc-pyrophosphate]	4	371 (53%)
¹⁸ F-ФДГ [¹⁸ F-FDG]	2	137 (39%)
⁶⁸ Ga-ПСМА-617 [⁶⁸ Ga-PSMA-617]	2	61 (41%)
⁶⁴ Cu-моноклональные антитела [⁶⁴ Cu-monoclonal antibodies]	2	15 (13%)
	24	48 (40%)

Таблица 3

Активности радионуклидов в сточных водах, образующиеся в транспорте, удельная активность сточных вод в баке биотуалета в транспорте и мощность дозы на расстоянии 1 метр от бака

[Table 3]

Radionuclide activity generated in the sewage water from patient in transport, the activity concentration of sewage water in the toilet tank in transport and the dose rate at 1 meter from the tank

РФЛП [Radiopharmaceutical]	Критерий отнесения к ЖРО, Бк/г [Criteria for classifying liquid waste as radioactive, Bq/g]	Вид транспорта до места проживания [Type of transport to the place of residence]	Выводимая активность в транспорте, МБк [Excreted radionuclide activity in transport, MBq]	Удельная активность в баке биотуалета, Бк/г [Activity concentration in the toilet tank in transport, Bq/g]	Мощность дозы, мкЗв/ч [Dose rate, μSv/h]
^{99m} Tc-пирофосфат [^{99m} Tc-pyrophosphate]	100	электропоезд/автобус [commuter train/bus]	46	460	0,8
		поезд [intercity train]	82	270	1,5
		самолет [plane]	61	200	1,1
¹⁸ F-ФДГ [¹⁸ F-FDG]	10	электропоезд/автобус [commuter train/bus]	48	480	6,5
		поезд [intercity train]	48	160	6,5
		самолет [plane]	22	75	3,0
⁶⁸ Ga-ПСМА-617 [⁶⁸ Ga-PSMA]	0,5	электропоезд/автобус [commuter train/bus]	9	90	1,2
		поезд [intercity train]	9	31	1,2
		самолет [plane]	2	6	0,2
⁶⁴ Cu-моноклональные антитела [⁶⁴ Cu-monoclonal antibodies]	100	электропоезд/автобус [commuter train/bus]	4	44	0,1
		поезд [intercity train]	10	35	0,3
		самолет [plane]	7	25	0,2

Полученные результаты показывают, что удельная активность радионуклидов в сточных водах в биотуалете транспортного средства после посещения его пациентом после РНД может превышать предельное значение отнесения отходов к ЖРО. Мощность дозы на расстоянии 1 метр от баков биотуалетов со сточными водами может превышать 1 мкЗв/ч, что может быть зарегистрировано на пунктах радиационного контроля транспортной инфраструктуры, привести к нештатной (аварийной) ситуации и задержанию транспортного средства. Однако, максимальная активность диагностических радионуклидов с коротким

периодом полураспада и соответствующая мощность дозы от бака со сточными водами биотуалета (таблица 3) будет отмечаться в первые часы после начала поездки пациента в транспорте. За счет короткого периода полураспада активность радионуклидов в сточных водах в баке биотуалета и соответственно мощность дозы будет быстро снижаться. Как показано в таблице 4, эффективные дозы у пассажиров и проводников, технического персонала, обслуживающего баки, и других лиц из населения от этих отходов не превысят допустимого значения от обращения с радиоактивными отходами (100 мкЗв/год)³.

Таблица 4

Эффективные дозы облучения критических групп лиц от бака биотуалета за 1 поездку/рейс

[Table 4

Effective doses for the critical groups from sewage tank per 1 trip]

Вид транспорта до места проживания [Type of transport to the place of residence]	Группа критических лиц [Critical groups]	Эффективная доза, мкЗв [Effective dose, μSv]			
		^{99m} Tc-пирофосфат [^{99m} Tc-pyrophosphate]	¹⁸ F-ФДГ [¹⁸ F-FDG]	⁶⁸ Ga-ПСМА-617 [⁶⁸ Ga-PSMA]	⁶⁴ Cu-моноклональные антитела [⁶⁴ Cu-monoclonal antibodies]
Электропоезд/автобус [commuter train/bus]	Пассажиры/экипаж [Passengers/crew]	1,5	9,1	1,4	0,21
	Технический персонал [Staff]	1,6	12	2,0	0,22
Поезд [intercity train]	Пассажиры/экипаж [Passengers/crew]	13	17	1,9	4,4
	Технический персонал [Staff]	2,9	12	2,0	0,52
Самолет [plane]	Пассажиры/экипаж [Passengers/crew]	5,4	7,4	0,4	1,1
	Технический персонал [Staff]	2,2	5,5	0,4	0,36

Результаты исследования показали, что, при прямом следовании нормативным требованиям, необходимо собирать и выдерживать отходы в специальных емкостях в медицинской организации для снижения удельной активности радионуклидов в них ниже уровня отнесения к ЖРО, т.е. предусматривать систему спецканализации в отделениях РНД. Объем спецканализации должен определяться в каждом случае индивидуально для медицинской организации на этапе проектирования в зависимости от задач, применяемых РФЛП и потока пациентов, что существенно удорожит и усложнит процедуры РНД, а в ряде случаев для дей-

ствующих в настоящее время подразделений РНД сделает их проведение невозможным.

Таким образом, возможны следующие варианты обращения с биологическими отходами пациентов:

- устанавливать в отделениях ядерной медицины небольшие сборники для ЖРО. Альтернативой спецканализации для небольшого потока пациентов, или при невозможности конструктивно разместить систему спецканализации в медицинской организации, является использование специализированных биотуалетов с защищенными сборниками для сточных вод, относящихся по уровню удельной активности к ЖРО.

³ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 г. № 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 № 18115) [Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10 «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 No. 41970) (In Russ.)]

– проводить РНД без использования системы специализации, ограничивая годовое потребление активности, исходя из объемов водоотведения медицинской организации (рисунок 2) и ограничивая активность на рабочем месте. При этом в систему водоотведения допускается сливать только биологические отходы пациентов, а при работе с несколькими радионуклидами годовой баланс активности для каждого радионуклида будет ниже. Ограничение активности на рабочем месте необходимо для равномерного распределения пациентов в течение года и недопущения одновременного сброса биологических отходов, содержащих радионуклиды, в систему водоотведения медицинской организации. Все прочие ЖРО, например, остатки РФЛП во флаконах и шприцах, необходимо собирать отдельно и выдерживать на распад в отделении.

В связи с тем, что превышение мощности дозы от пациентов с введённым диагностическим РФЛП может приводить к срабатыванию досмотровых систем на пунктах радиационного контроля транспортной инфраструктуры, при проектировании отделения должно быть обосновано время нахождения пациентов до выхода из отделения, а также

время, в течение которого пациенты должны воздержаться от совершения авиаперелётов и поездок на поездах и междугородних автобусах. Эти временные промежутки должны содержаться в регламентах проведения диагностических процедур ядерной медицины и применяться в повседневной работе отделения при проведении исследований и инструктировании пациентов.

Заключение

В работе для ряда РФЛП, применяемых в диагностике, определены активности радионуклидов, выводимые с мочой пациентов, а также удельные активности в сточных водах медицинской организации и баках биотуалетов в общественном транспорте во время перемещения пациента до места его проживания. На основании полученных результатов показано, что отсутствие необходимости в сборе и выдержки на распад биологических отходов пациентов после процедур РНД должно обосновываться на этапе проектирования отделения РНД с учетом планируемого перечня радионуклидов, потока пациентов и объемов водоотведения медицинской организации.

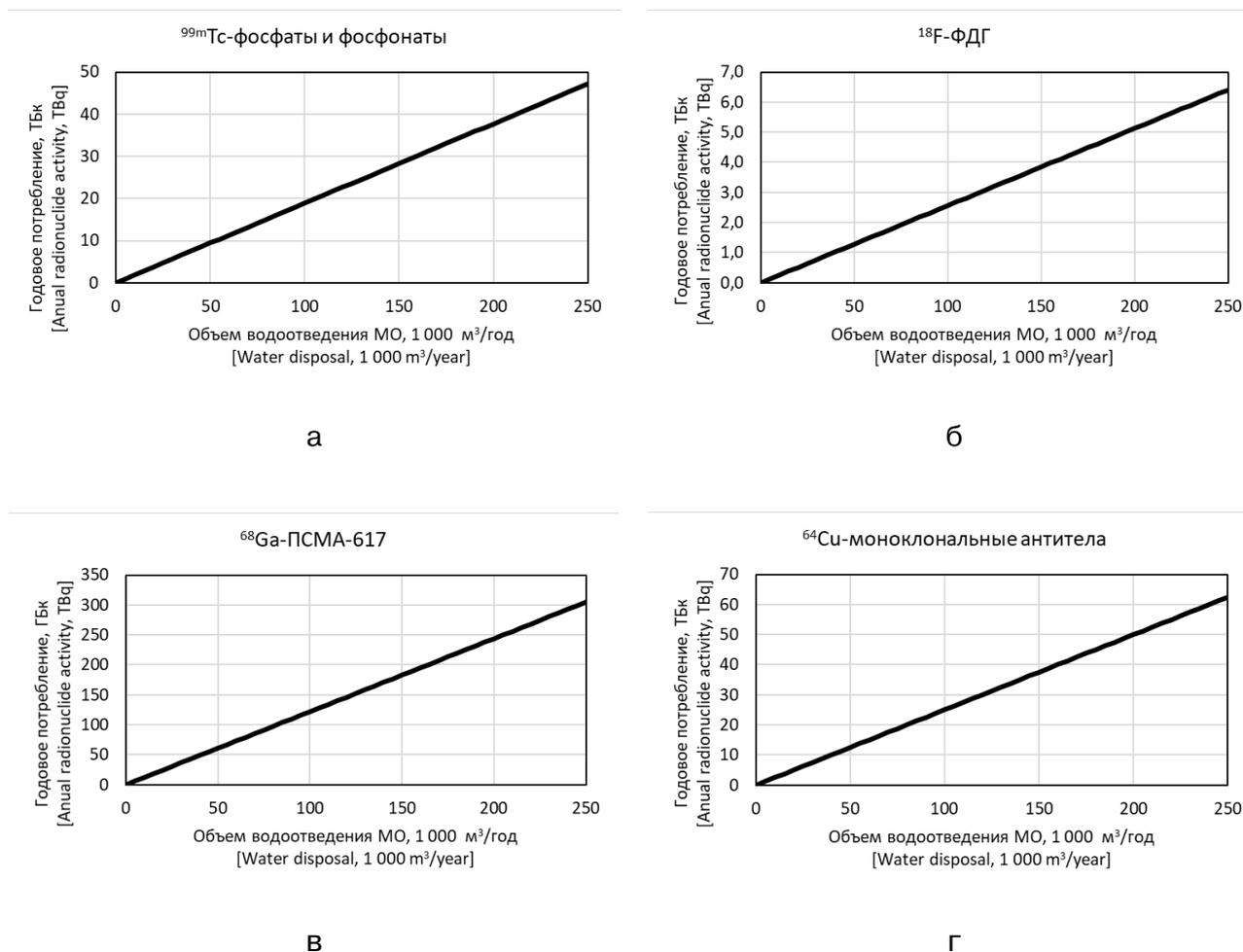


Рис. 2. Сопоставление годового баланса активности радионуклидов и водоотведения МО для: а – ^{99m}Tc -фосфаты и фосфонаты; б – ^{18}F -ФДГ; в – ^{68}Ga -ПСМА-617, г – ^{64}Cu -моноклональные антитела
[Fig. 2. Comparison of the annual radionuclide activity balance and hospital water disposal for: а – ^{99m}Tc - labeled phosphate and phosphonate agents; б – ^{18}F -FDG; в – ^{68}Ga -PSMA-617, г – ^{64}Cu -monoclonal antibodies]

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

Чипига Л.А. – научное руководство исследованием, разработка дизайна исследования, поиск и анализ литературы, проведение расчетов, формулировка научных гипотез, обработка и анализ полученных результатов, написание текста статьи.

Рыжов С.А. – поиск и анализ литературы, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

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

Звонова И.А. – поиск и анализ литературы, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов.

Петрякова А.В. – поиск и анализ литературы, проведение расчетов.

Станжевский А.А. – обсуждение результатов исследования.

Киселев К.Д. – обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи, перевод.

Глотова И.В. – обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи, перевод.

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», а также в рамках двух НИР: «Научное развитие медико-технологических и организационных аспектов обеспечения радиационной безопасности при оказании медицинской помощи» (№ ЕГИСУ: №123031500006-9) и «Разработка персонализированных методов радионуклидной диагностики и терапии у детей, а также радиологического контроля, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта» (№ ЕГИСУ: №124021200036-9).

Литература

1. IAEA-TECDOC-1183. Management of radioactive waste from the use of radionuclides in medicine. IAEA: Vienna, 2000. 83 p.
2. 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.
3. 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.
4. Официальный сайт Международного Медицинского Центра «УРО-ПРО» Сочи. URL: <https://sochi.upclinic.ru/information/urologiya-seksologiya/rasstroystva-mocheispushkaniya/> (Дата обращения: 11.06.2024).
5. International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: a compendium of current information related to frequently used substances. ICRP Publication 128. Ann. ICRP, 2015. 44(2S).
6. International Commission on Radiological Protection. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP, 2008. 38 (3).
7. Dowd M.T., Chen C.T., Wendel M.J., et al. Radiation dose to the bladder wall from 2-[18F] fluoro-2-deoxy-D-glucose in adult humans // Journal of Nuclear Medicine. 1991. Vol. 32, No 4. P. 707-712.
8. Chen C.T., Harper P.V., Lathrop K.A. A simple dynamic model for calculating radiation absorbed dose to the bladder wall / 4th International Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium. 1985. P. 5-8.
9. Kurth J., Krause B.J., Schwarzenbock S.M., et al. External radiation exposure, excretion, and effective half-life in 177Lu-PSMA-targeted therapies // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging research. 2018. Vol. 8, No 1. P. 1-11. DOI: 10.1186/s13550-018-0386-4.
10. Петрякова А.В., Чипига Л.А., Звонова И.А. и др. Проблемы радиационной безопасности при передвижении в общественном транспорте пациента после радионуклидной терапии с 131I // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 97-108. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-97-108.

Поступила: 18.06.2024

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

ORCID: 0000-0001-9153-3061 SPIN 3920-7798

Рыжов Сергей Анатольевич – вице-президент Ассоциации медицинских физиков России; начальник отдела радиационной безопасности и медицинской физики Национального медицинского исследовательского центра детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева; научный сотрудник Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-0640-7368

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

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

ORCID: 0000-0003-4340-8666

Петрякова 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

ORCID: 0000-0003-2663-9091 SPIN 1683-4733

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

ORCID: 0000-0002-1630-0564 SPIN 4025-4260

Киселев Кирилл Дмитриевич – сотрудник отдела радиационной безопасности и медицинской физики Национального медицинского исследовательского центра детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева; обучающийся Инженерно-физического института биомедицины Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» Министерства образования и науки Российской Федерации, Москва, Россия

ORCID: 0009-0000-1293-7608

Глотова Ирина Владимировна – сотрудник отдела радиационной безопасности и медицинской физики Национального медицинского исследовательского центра детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева; обучающийся Инженерно-физического института биомедицины Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» Министерства образования и науки Российской Федерации, Москва, Россия

ORCID: 0009-0002-4756-7971

Для цитирования: Чипига Л.А., Рыжов С.А., Водоватов А.В., Звонова И.А., Петрякова А.В., Станжевский А.А., Киселев К.Д., Глотова И.В. Проблемы обращения с биологическими отходами пациентов в радионуклидной диагностике // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 29–38. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-29-38

Problems of management of patient biological waste in radionuclide diagnostics

Larisa A. Chipiga^{1,2,3,4}, Sergey A. Ryzhov^{4,5,6}, Aleksandr V. Vodovатов^{1,7}, Irina A. Zvonova¹, Anastasia V. Petryakova^{1,8},
Andrey A. Stanzhevsky², Kirill D. Kiselev^{5,9}, Irina V. Glotova^{5,9}

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 Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

⁵ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁶ Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

⁷ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

⁸ The City Hospital No 40 of the Kurortny District, Saint Petersburg, Russia

⁹ National Research Nuclear University «MEPhI», Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow, Russia

Biological excretion from patients (urine) generated during radionuclide diagnostics enters directly into the hospital sewage system. The establishment of new clearance level according to Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1069 of October 19, 2012 may entail amendments to regulatory documents for radionuclide diagnostics departments. One of these requirements is a mandatory dedicated sewage system. Establishment of the requirement may lead to an increase the cost of the radionuclide diagnostic examinations, and to a decrease the accessibility of radionuclide diagnostic. The aim of this study was to estimate the activity of radionuclides in patient urine after radionuclide diagnostic and activity concentration in sewage water in the hospital and in the transport tank of toilet for evaluation of paths of waste manage. Based on published literature data, models of biological excretion were constructed for the following radiopharmaceuticals: ^{99m}Tc-pyrophosphate, ⁶⁴Cu-Labeled Monoclonal Antibody, ¹⁸F-FDG, ⁶⁸Ga-PSMA-617. The activity of radionuclides in the patient waste in the hospital and in public transport during the patient transportation to home was calculated. Various scenarios of patient transportation were considered. The values of the excreted activity, activity concentration and dose rate at 1 m from the tank with sewage water for each type of transport were calculated. The calculated values of the radionuclide activity concentration in sewage water in transport tank of toilet for the majority scenarios exceed the clearance level (up to 180 times for ⁶⁸Ga-PSMA-617 when traveling by bus). According the regulatory requirements, it is necessary to collect patient excretions after radionuclide diagnostic examinations and hold it for decay. However, estimated effective doses of individuals from the public from contact with biological patient waste do not exceed the acceptable value. This is due to the short half-life of diagnostic radionuclides. The paths of management system of biological patient waste were proposed.

Key words: radionuclide diagnostic, patient, biological waste, public exposure, clearance level, 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.

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

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

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

Petryakova A.V. – search and analysis of literature, calculations.

Stanzhevsky A.A. – discussion of the results.

Kiselev K.D. – discussion of the results, editing the text of the article, translation.

Glotova I.V. – discussion of the results, editing the text of the article, translation.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

The work was performed as a part of the program of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being «Development and scientific justification of a set of measures to ensure radiation protection in nuclear medicine» and within the framework of the research works «Scientific development of medical technological and organizational aspects of radiation safety in the provision of medical care» (No. EGISU: №123031500006-9) and «Development of personalized methods of radionuclide diagnostics and therapy of children and radiological control including using artificial intelligence technologies» (No. EGISU: 124021200036-9).

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

References

1. IAEA-TECDOC-1183. Management of radioactive waste from the use of radionuclides in medicine. IAEA: Vienna; 2000. 83 p.
2. 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.
3. 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.
4. Official website of the International Medical Center «URO-PRO» Sochi. Available from: <https://sochi.upclinic.ru/information/urologiya-seksologiya/rasstroystva-mocheispuskaniya/> (Accessed: 11.06.2024).
5. International Commission on Radiological Protection. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128. *Annals of the ICRP*; 2015;44(2S).
6. International Commission on Radiological Protection. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. *Annals of the ICRP*; 2008;38 (3).
7. Dowd MT, Chen CT, Wendel MJ, et al. Radiation dose to the bladder wall from 2-[18F] fluoro-2-deoxy-D-glucose in adult humans. *Journal of Nuclear Medicine*. 1991;32(4): 707-712.
8. Chen CT, Harper PV, Lathrop KA. A simple dynamic model for calculating radiation absorbed dose to the bladder wall. 4th International Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium; 1985: 587-612.
9. Kurth J, Krause BJ, Schwarzenbock SM, Stegger L, Schäfers M, Rahbar K. External radiation exposure, excretion, and effective half-life in 177Lu-PSMA-targeted therapies. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging research*. 2018;8(1): 1-11. DOI: 10.1186/s13550-018-0386-4.
10. Petryakova AV, Chipiga LA, Zvonova IA, Vodovatov AV, Gorsky GA, Stanzhevsky AA. Radiation safety problems during the patient traveling by public transport after radiopharmaceutical therapy with 131I. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 97-108. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-97-108.

Received: June 18, 2024

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 Well-Being; 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)

ORCID: 0000-0001-9153-3061 SPIN 3920-7798

Sergey A. Ryzhov – vice president, Association of Medical Physicists in Russia; research fellow, Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies; head of the radiation safety and medical physics department, Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-0640-7368

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 Well-Being; docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Irina A. Zvonova – Doctor of Technical 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 Well-Being, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-4340-8666

Anastasia V. Petryakova – 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

ORCID: 0000-0003-2663-9091

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

ORCID: 0000-0002-1630-0564

Kirill K. Kiselev – employee of the radiation safety and medical physics department, Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation; student of the Institute for physics and engineering in biomedicine of National research nuclear university MEPhI, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow, Russia

ORCID: 0009-0000-1293-7608

Irina V. Glotova – employee of the radiation safety and medical physics department, Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation; student of the Institute for physics and engineering in biomedicine of National research nuclear university MEPhI, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow, Russia

ORCID: 0009-0002-4756-7971

For citation: Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Vodovatov A.V., Zvonova I.A., Petryakova A.V., Stanzhevsky A.A., Kiselev K.D., Glotova I.V. Problems of management of patient biological waste in radionuclide diagnostics. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 29–38. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-29-38.

Риск смерти от злокачественных новообразований в Уральской когорте потомков облученного населения

Д.А. Завьялов, Л.Ю. Крестинина

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

Целью данной работы является анализ смертности от всех солидных злокачественных новообразований у потомков родителей, облученных на Южном Урале, и оценка риска смерти потомков в зависимости от доз на гонады родителей, а также предварительная оценка риска смерти от рака отдельных локализаций в зависимости от гонадной дозы. Проблема трансгенерационных эффектов облучения половых клеток человека остается актуальной до настоящего времени. Имеются неоспоримые доказательства наличия таких эффектов у экспериментальных животных, но доказательства наличия таких эффектов у человека, несмотря на большое количество работ по теме, отсутствуют. Мировое научное сообщество и международные организации, в числе которых НКДАР и МКРЗ, трактуют этот вопрос как нерешенный, требующий дальнейших исследований. В 2022 г. в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины была сформирована Уральская когорта потомков населения, облученного на реке Тече и на территории Восточно-уральского радиоактивного следа. Важной особенностью данной когорты является исключение из неё потомков, облученных в постнатальном периоде. По данным на сентябрь 2023 г. численность когорты составила 31154 человека, а число человеко-лет за период наблюдения с 1950 по 2020 г. составило 1226380. Средняя доза на гонады матерей всех членов когорты составила 41 мГр, на гонады отцов – 35 мГр, средняя суммарная – 76 мГр. За весь период наблюдения в когорте зарегистрировано 3774 случая смерти от всех причин, включая 284 смерти от солидных злокачественных новообразований. Средний возраст членов когорты к концу периода наблюдения составил 42 года. Анализ риска смерти проводился с использованием Пуассоновской регрессии программами статистического пакета EPICURE. При анализе риска были протестированы три модели дозовой зависимости: линейная, квадратичная и линейно-квадратичная от дозы на гонады отца, на гонады матери и суммарной гонадной дозы. Анализ риска смерти от всех солидных злокачественных новообразований в когорте потомков не выявил статистически значимой зависимости от гонадной дозы родителей (были получены положительные, но статистически не значимые, величины риска смерти), что согласуется с результатами других исследований в популяциях человека. В то же время, в результате анализа впервые получена статистически значимая линейная зависимость риска смерти от солидных злокачественных новообразований у потомков с возрастом отца на момент рождения старше 45 лет в зависимости от дозы на гонады отца. Избыточный относительный риск смерти составил 8,09/Гр (95%ДИ: 0,51; 22,93), $p < 0,05$. Также впервые получено доказательство дозовой зависимости риска смерти от рака легкого у мужчин-потомков от дозы на гонады матери, гонады отца, и суммарной гонадной дозы. Величины избыточного относительного риска рака легкого и 95% доверительных интервалов, согласно линейной модели, составили 5,39/Гр (0,46 - 15,56) – от дозы на гонады отца, 4,36/Гр (0,15-13,48) – от дозы на гонады матери, и 3,95/Гр (0,55-12,14) – от суммарной гонадной дозы. Точечные оценки риска смерти от рака легкого на данном этапе отличаются широкими доверительными интервалами, и требуют дополнительных исследований с оценкой влияния возможных модификаторов эффекта, но с большой долей вероятности указывают на наличие дозовой зависимости данного эффекта. Увеличение периода наблюдения и достигнутого возраста в будущем приведет к увеличению случаев злокачественных новообразований и позволит получить более корректные оценки риска смерти в когорте потомков.

Ключевые слова: Уральская когорта потомков облученного населения, УКПОН, избыточный относительный риск смерти, солидные злокачественные новообразования, рак легких, доза на гонады.

Введение

Целью данной работы является анализ смертности от всех солидных злокачественных новообразований у потомков родителей, облученных на Южном Урале, и оценка риска смерти потомков в зависимости от доз на гонады родителей, а также предварительная оценка риска смерти от рака отдельных локализаций в зависимости от гонадной

дозы. До настоящего времени остаётся нерешенным вопрос об эффектах облучения половых клеток человека у потомков. Несмотря на многолетнюю работу ученых всего мира, как отдельные публикации, так и обзоры литературы всё ещё показывают большую неопределённость в вопросе трансгенерационных эффектов облучения у людей. На данный момент есть доказательства того, что результатом облучения экспериментальных животных могут

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ludmila@urcrfm.ru

быть различные мутации в половых клетках и радиационно-индуцированная нестабильность генома, которые способны вызывать разнообразные трансгенерационные эффекты у потомства [1, 2]. Публикация 103 МКРЗ и отчет НКДАР за 2013 год [3, 4], а так же два крупных обзора литературы по теме проведенных в прошлом десятилетии, один из которых проведен коллективом авторов из Англии и США во главе с М.Р. Little [5], а другой нашими коллегами из Южно-Уральского института биофизики [6], говорят о том, что на данный момент нет убедительных доказательств наличия таких эффектов у людей и этот вопрос требует дальнейших исследований.

Авторы исследования по оценке влияния облучения отцов ликвидаторов аварии на ЧАЭС на заболеваемость потомков первого поколения, не обнаружили влияния облучения отцов на заболеваемость. Кроме того, не было обнаружено статистически значимых рисков заболеваемости для большинства классов и рубрик заболеваемости [7]. Недавние исследования в японской когорте потомков лиц, выживших после атомных бомбардировок, также не показывают повышенного риска злокачественных новообразований (ЗНО) или других заболеваний из-за воздействия радиации на родителей. Тем не менее авторы акцентируют внимание на том, что наблюдение за когортой потомков следует продолжать в течение нескольких десятилетий [8, 9].

Первые исследования эффектов у потомков облученного на Южном Урале населения проводились у потомков членов когорты реки Течи, меньшей численности, за меньший период наблюдения, и когорта включала потомков, которые сами могли получить постнатальное облучение [10, 11]. Уральская когорта потомков облученного населения (УКПОН) отличается тем, что включает в себя потомков родителей, облученных как на реке Тече, так и на ВУРСе, которые не были облучены в постнатальном периоде. Это позволяет отделить эффекты облучения половых клеток родителей от эффектов постнатального облучения. Сформированная когорта позволит оценивать влияние гонадных доз родителей на различные эффекты, среди которых онкологические и многофакторные заболевания, а также генетические заболевания и синдромы [12].

Материалы и методы

Характеристика УКПОН

С момента последней публикации [12] была обновлена информация о местах проживания, жизненном статусе и причинах смерти потомков, облученного населения. Территория наблюдения (ТН) за смертностью включала всю Челябинскую и Курганскую области. Период наблюдения был расширен на 2 года и составил 71 год, с 1950 по 2020 годы.

За 2023 год из аналитической когорты потомков (34548 человек), выбранных в соответствии с критериями, были исключены 3394 человека, которые после рождения не проживали на территории наблюдения за смертностью в период с 01.01.1950 по 31.12.2020 г. В итоге численность аналитической когорты на конец 2023 года составила 31154 человек, а число человеко-лет за период наблюдения с 1950 по 2020 г. составило 1226380.

Информация о жизненном статусе членов когорты

В таблице 1 представлен жизненный статус членов когорты потомков к концу 2020 г. За весь период наблюдения 3920 человек (около 13% от 31154 чел.) мигрировали с ТН,

19470 человек живы и проживают на ТН в 2020 г, 4424 человека (14,2% от всей когорты) умерли на ТН, 3340 человек потеряны из наблюдения. Причина смерти известна для 3774 из 4424 человек.

Демографические характеристики УКПОН

В таблице 2 представлены демографические характеристики членов аналитической когорты потомков облученных родителей и распределение смертей от солидных злокачественных новообразований по полу, национальности и году рождения, зарегистрированных на ТН за весь период наблюдения.

В когорте примерно одинаковое количество мужчин и женщин, а татар и башкир на 12% меньше, чем русских. Также следует отметить то, что большая часть когорты родилась между 1960 и 1990 годами. Из 3774 случаев смерти с известной причиной зарегистрировано 284 смерти от солидных ЗНО, при этом больше смертей среди мужчин, относительно женщин, у русских, относительно татар и башкир. Обращает на себя внимание, что ~55% всех смертей от ЗНО относятся к людям, родившимся с 1960 по 1969, составлявшим только 35% от всей когорты и которые к концу наблюдения могли достичь возраста 50-60 лет. Средний возраст членов когорты к концу периода наблюдения составил 42 года.

Дозовые характеристики УКПОН

Важным отличием УКПОН является исключение из неё потомков облученных постнатально. Это позволяет исследовать влияние только преконцептивного облучения на отдаленные последствия у потомков облученного населения. Для оценки зависимости риска здоровью от гонадной дозы родителей сотрудниками биофизической лаборатории были рассчитаны дозы на гонады матери и гонады отца на дату рождения ребенка. Расчет проводился с использованием дозиметрической системы TRDS-2016 [13]. Родители потомков являются членами Уральской когорты аварийно облученного населения (УКАОН), следовательно, для них справедливы все закономерности дозовых характеристик УКАОН, т.е. их облучение имеет хронический комбинированный характер, в диапазоне малых и средних доз до 1 Гр, с низкой мощностью дозы.

В таблице 3 представлены средняя медианная и максимальная дозы на гонады родителей. В целом доза на гонады матери у потомков немного выше, чем доза на гонады отца. Средняя доза на яичники матерей всех членов УКПОН составила 40,5 мГр, на яички отцов – 35,1 мГр, средняя суммарная 75,6 мГр. Медианная доза значительно ниже средней во всех дозовых группах, так доза на яичники матери 5 мГр, доза на яички отца 4 мГр, суммарная 18,9 мГр.

Максимальные дозы облучения не превышают 1 – 1,2 Гр. Средние, медианные, и максимальные дозы для мужчин и женщин практически не отличаются. Средние и медианные дозы на татар и башкир больше, чем для русского населения.

Описание случаев смерти

Повозрастное распределение случаев смерти показано в таблице 4. Видно, что наименьший процент смертей от ЗНО в УКПОН в возрастных группах до 30 лет. Наблюдается рост смертности от ЗНО после 30 лет и до 60 с максимумом от 50 до 59 лет.

Таблица 1

Жизненный статус членов УКПОН

[Table 1]

Vital status for the UCEPO*members]

Жизненный статус к 31.12.2020 [Vital status as of 31.12.2020]	Число человек [Person number]	%
Жив на ТН [Alive, living in catchment area]	19470	62,5
Умер на ТН, в том числе: [Dead in catchment area, including:]	4424	14,2
причина смерти известна [known cause of death]	3774	85,3
причина смерти не известна [unknown cause of death]	650	14,7
Потерянные из наблюдения [Lost to follow-up]	3340	10,7
Всего на ТН к 31.12.2020 [Total in catchment area]	27234	87,4
Мигранты за пределы Челябинской и Курганской областей [Migrants who left the Chelyabinsk and Kurgan regions]	3920	12,6
Всего в аналитической когорте [Total in analytical cohort]	31154	100

[*UCEPO – Urals Cohort of Exposed Population Offspring]

Таблица 2

Демографические характеристики аналитической УКПОН

[Table 2]

Demographic characteristics of the analytical UCEPO]

Характеристики когорты [Cohort characteristics]	Число человек [Person number]		Смерти от солидных ЗНО [Solid cancer deaths]	
	n	%	n	%
Всего [Total]	31154	100,0	284	100
Мужчины [Male]	15767	50,6	153	54
Женщины [Female]	15387	49,4	131	46
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	13691	43,9	128	45,3
Русские [Russians]	17463	56,1	156	54,7
Год рождения [Year of birth]				
1950-1959	2107	6,8	50	17,6
1960-1969	11145	35,8	157	55,3
1970-1979	10770	34,6	56	19,7
1980-1989	6472	20,8	20	7,0
1990-1999	611	2	1	0,4
2000-2009	43	0,1	0	0
2010-2019	6	0	0	0

Случаи смерти от новообразований (НО) включают 284 солидных ЗНО или 87,9% от всех НО, 35 смертей (10,8%) от гемобластозов и 3 случая смерти (1%) от доброкачественных опухолей, опухолей in situ или неопределенного и неуточненного характера.

Структура причин смерти от солидных ЗНО разных локализаций представлена в таблице 5. В группу «другие ЗНО» были объединены солидные ЗНО с малым количеством случаев, например, опухоли щитовидной железы, костей, сердца и т.п. и ЗНО без указанной локализации.

Среди женщин преобладают смерти от ЗНО молочной железы 20,6%. Вторые по смертности раки шейки матки 14,5%. На третьем месте ЗНО яичника и придатков, и ЗНО желудка – по 9,9%. Среди мужчин преобладают смерти от ЗНО органов дыхания – 21,6%, затем от ЗНО желудка и мочевыделительной системы, 11,8% и 9,8% соответственно. Во всей УКПОН наибольшее число случаев смерти от ЗНО органов дыхания – 13,7%, на втором месте – рака желудка 10,9%, на третьем- ЗНО мочевыделительной системы, а также печени и поджелудочной железы (по 6,7%).

Таблица 3

Дозовые характеристики когорты

[Table 3]

Dose characteristics of the cohort]

Характеристики когорты [Cohort characteristics]	Накопленная поглощенная доза [cumulative absorbed dose]		
	Средняя [Mean]	Медианная [Median]	Максимальная [Maximum]
Доза на гонады матери, мГр [Dose to the mother's gonads, mGy]			
Вся когорта [Whole cohort]	40,5	5,0	1144,7
Мужчины [Males]	40,2	5,0	1144,7
Женщины [Females]	40,8	5,0	916,7
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	56,3	11,3	651,9
Русские [Russians]	27,0	3,0	1144,7
Доза на гонады отца, мГр [Dose to the father's gonads, mGy]			
Вся когорта [Whole cohort]	35,1	4,0	1099,2
Мужчины [Males]	34,1	3,6	1099,1
Женщины [Females]	36,1	4,3	1099,2
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	49,1	8,3	644,9
Русские [Russians]	23,1	1,3	1099,2
Суммарная доза, мГр [Combined gonadal dose of parents, mGy]			
Вся когорта [Whole cohort]	75,6	18,9	1241,1
Мужчины [Males]	74,3	18,3	1211,2
Женщины [Females]	76,9	19,5	1241,1
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	105,4	72,9	1185,5
Русские [Russians]	50,1	15,0	1241,1

Таблица 4

Повозрастное распределение случаев смерти от солидных ЗНО в УКПОН

[Table 4]

Age distribution of deaths from solid cancers in UCEPO]

Возрастная группа, лет [Age group, years]	Смертей от всех причин [Deaths from all causes]	Смертей от солидных ЗНО [Deaths from solid cancers]	Доля умерших от солидных ЗНО от всех смертей в когорте, % [Proportion of solid cancer deaths out of all deaths in the cohort, %]
0-9	884	16	1,8
10-19	187	4	2,1
20-29	507	17	3,4
30-39	829	41	4,9
40-49	789	82	10,4
50-59	518	105	20,3
60-69	60	19	31,7
Всего [Total]	3774	284	7,5

Структура причин смерти от солидных ЗНО по локализациям у потомков облучённого на Южном Урале населения

[Table 5

Structure of solid cancer deaths by sites in descendants of the population exposed to radiation in the Southern Urals]

Локализация новообразований [Malignancies sites]	Число случаев (%) [Cases (%)]		
	Мужчины [Males]	Женщины [Females]	Всего [Total]
Полость рта, язык, носоглотка [Oral cavity, tongue, nasopharynx]	8 (5,2)	1 (0,8)	9 (3,2)
Пищевод [Esophagus]	4 (2,6)	2 (1,5)	6 (2,1)
Желудок [Stomach]	18 (11,8)	13 (9,9)	31 (10,9)
Толстая кишка [Colon]	7 (4,6)	11 (8,4)	18 (6,3)
Прямая кишка [Rectum]	10 (6,5)	4 (3,1)	14 (4,9)
Печень и желчные протоки, поджелудочная железа [Liver and bile ducts, pancreas]	14 (9,1)	5 (3,8)	19 (6,7)
Трахея, бронхи, лёгкие [Trachea, bronchi, lungs]	33 (21,6)	6 (4,6)	39 (13,7)
Молочная железа [Breast]	0	27 (20,6)	27 (9,5)
Тело матки, матки неуточнённые [Corpus uteri, uterus, unspecified]	0	7 (5,3)	7 (2,5)
Шейка матки [Cervix]	0	19 (14,5)	19 (6,7)
Яичник и придатки [Ovary and appendages]	0	13 (9,9)	13 (4,6)
Мужские половые органы [Male genital organs]	5 (3,3)	0	5 (1,8)
Мочевыделительная система [Urinary system]	15 (9,8)	4 (3,1)	19 (6,7)
Головной мозг, нервная система [Brain, nervous system]	11 (7,2)	11 (8,4)	22 (7,7)
Другие ЗНО [Other malignancies]	28 (18,3)	8 (6,1)	36 (12,7)
Всего [Total]	153 (100)	131 (100)	284 (100)

Статистические методы

Для оценки дозовой зависимости смертности в УКПОН от доз на гонады родителей были использованы программы DATAB и AMFIT статистического пакета EPICURE. Анализ проводился в соответствии с методикой [14]. Статистические методы, используемые для анализа рисков в УКПОН, не отличаются от анализа рисков в УКАОН и более подробно описаны в прошлых публикациях [15, 16].

Первый этап анализа данных проводится с помощью программы DATAB. Все данные преобразуются в формат сводных таблиц, в которых случаи и человеко-годы стратифицируются по различным параметрам. В ходе данного анализа данные стратифицировались по следующим группам: пол, национальность (татары и башкиры или русские), территория наблюдения (6 категорий), достигнутый возраст (8 категорий по 10 лет), возраст на начало облучения (6 категорий по 10 лет), период наблюдения (8 категорий), дозовые категории, для дозы на гонады отца, матери или их суммарной дозы (8 категорий с начальными дозами 0; 0,002; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 > Гр), наличие рака у родственников (есть или нет).

Перед расчетом избыточного относительного риска (ИОР) смерти от ЗНО проводился анализ базовых уровней смертности от нерадиационных факторов. Для оценки дозовой зависимости использовался регрессионный анализ с Пуассоновским распределением по простой параметрической модели ИОР, с помощью программы AMFIT. Статисти-

ческая значимость и доверительные интервалы оценены методом максимального правдоподобия с 95% значимостью.

Результаты и обсуждение

Зависимость базовых уровней от нерадиационных факторов

Во время анализа влияния нерадиационных факторов на базовые уровни смертности в когорте тестировались различные сочетания параметров, наиболее значимое сочетание включалось в модель. Тестировали влияние следующих параметров: пол, национальность, наличие рака у родственников, возраст матери и отца на момент рождения ребёнка (до 45 лет и более для отца и до 35 лет и более для матери), период наблюдения (до 1986 и после), логарифмическая зависимость от достигнутого возраста.

Анализ влияния нерадиационных факторов на базовые уровни смертности от солидных ЗНО у потомков, показал статистически значимое влияние следующих параметров: национальность, наличие рака у родственников, период наблюдения, достигнутый возраст. Различия в базовых уровнях состояли в следующем: смертность ниже у татар и башкир, ниже после 1986 г, смертность растёт с достигнутым возрастом.

При анализе риска ЗНО легких значимое влияние на базовые уровни смертности оказывали только пол (смертность была выше у мужчин) и достигнутый возраст (увеличение показателей смертности от ЗНО лёгких с увеличением возраста).

Дозовая зависимость смертности от солидных ЗНО в УКПОН

После оценки базовых уровней смертности от нерадиационных факторов и включения их в модель, были протестированы линейная, квадратичная и линейно-квадратичные зависимости показателей смерти от солидных ЗНО от материнской гонадной дозы, от отцовской гонадной дозы и от суммарной дозы на гонады родителей.

При подборе модели, наилучшим образом, описывающей дозовую зависимость, сравнивались рассчитанные программой параметры: «отклонение», 95% доверительные интервалы, их диапазон, и p -значение. Результаты оценки дозовой зависимости смертности от солидных ЗНО в УКПОН от дозы на гонады родителей представлены в таблице 6.

Анализ риска смерти от солидных ЗНО у потомков облученных родителей не выявил линейной зависимости от материнской, отцовской и суммарной гонадной дозы ($p > 0,5$ во всех случаях). Добавление к линейной модели квадратичного компонента дозы также не улучшало подгонку модели ($p > 0,5$), (данные в таблице не представлены из-за отсутствия информативности). При использовании квадратичной модели также не было выявлено зависимости ИОР от материнской, отцовской и суммарной гонадной дозы ($p > 0,5$; $p = 0,21$ и $p > 0,5$ соответственно).

Таким образом, можно констатировать, что на данный момент не получено доказательств зависимости величины риска смерти от всех солидных ЗНО от материнской, отцовской и суммарной дозы на гонады родителей. При этом наименьшая вероятность ошибки ($P = 0,21$) наблюдалась при оценке риска смерти от солидных ЗНО от отцовской гонадной дозы, на что надо обратить внимание при будущих исследованиях.

Такой результат можно связать, с малым количеством смертей от солидных ЗНО в данный момент, по причине относительно молодого среднего возраста членов когорты. Средний возраст когорты к концу периода наблюдения составляет 42 года, и только начинает приближаться к возрасту максимальной реализации случаев ЗНО (после 50-60 лет).

Кроме оценки риска смерти от всех солидных ЗНО в зависимости от гонадной дозы родителей, была предпринята попытка оценить дозовую зависимость риска смерти от ЗНО отдельных локализаций от доз на гонады родителей. Предварительный анализ был проведен для локализаций солидных ЗНО с наибольшим количеством смертей, среди них – ЗНО легких, желудка, молочной железы, шейки матки и толстой кишки. Оценка дозовой зависимости для указанных локализаций производилась по такой же методике, что и для всех солидных ЗНО. Данные по большинству из них здесь не приводятся в связи с отсутствием статистической значимости. На данном этапе были получены статистически значимые оценки дозовой зависимости только для ЗНО легких (таблица 7).

Зависимость смертности от ЗНО легкого от дозы на гонады матери хорошо описывалась как линейной, так и квадратичной моделью, но относительная ширина доверительного интервала указывает на лучшую подгонку линейной модели. Зависимость от дозы на гонады отца значимо описывалась только линейной моделью. Зависимость от суммарной дозы значимо описывается обеими моделями, но при использовании ширины доверительного интервала,

соотнесенного к величине риска, лучшая значимость наблюдалась при линейной модели. Необходимо также отметить, что различия между величинами риска, описанными разными моделями не были статистически значимыми.

Таким образом, для анализа риска смерти от ЗНО легких в УКПОН зависимость от всех доз на гонады родителей можно оценивать с использованием линейной модели.

Необходимо отметить, что при своей статистической значимости диапазон доверительных интервалов величин ИОР очень широкий, что говорит о наличии неопределенности, которая может быть связана с недостаточным количеством случаев на данном этапе исследований или с влиянием неучтенных факторов. Продолжение наблюдения за когортой с увеличением возраста членов когорты и числа человеко-лет поможет понять истинные зависимости эффекта и дозы.

Модификация дозового ответа

Несмотря на отсутствие на данном этапе статистически значимой дозовой зависимости смерти от всех солидных ЗНО в УКПОН и высокую неопределенность в оценке ИОР для отдельных локализаций ЗНО, мы проверили величины ИОР у членов когорты в зависимости от доступных нерадиационных факторов, в связи с возможной модификацией дозового ответа. Модификация ответа вычислялась на основе линейной модели для всех гонадных доз. В качестве модификаторов дозового ответа были использованы: пол, национальность, наличие рака у родственников, возраст отца и матери на момент рождения ребёнка, оценка ранней смертности (до 1 года), а также влияние достигнутого возраста (точки 5, 20, 50 лет). Статистически значимая величина ИОР смерти от всех солидных ЗНО была получена только для потомков с возрастом отца на момент рождения старше 45 лет в зависимости от гонадной дозы отца, ИОР составил 8,09 (95%ДИ: 0,51; 22,93), $p < 0,05$. Все остальные расчеты в зависимости от дозы на гонады матери или суммарной дозы, так и в других группах, не показали статистически значимых результатов и здесь не приводятся.

Значимые оценки риска смерти от ЗНО лёгких были получены в отдельных группах по полу, национальности, наличию рака у родственников, возрастам отца. Хотя на данном этапе оценки риска всё ещё сохраняют долю неопределенности, о чем говорит ширина доверительных интервалов, уже сейчас можно наблюдать некоторые тенденции в изменении дозового ответа в зависимости от отдельных факторов.

Были получены статистически значимые оценки ИОР смерти от рака легкого в группе мужчин, с максимальным ИОР 5,87/Гр (95%ДИ: 0,35; 18,27), $p < 0,05$ при использовании дозы на гонады отца. Для доз на гонады матери и суммарной дозы получены также статистически значимые, но меньшие значения (соответственно 4,69/Гр и 4,02/Гр). Отличия внутри групп по полу не значимы.

Различия в этнических группах оказались не значимы, но в группе русских был получен значимый показатель ИОР смерти от рака легкого от суммарной дозы 9,08/Гр (95%ДИ: 1,59; 28,41), $p < 0,05$.

Риск смерти от рака легкого был выше у членов когорты, с наличием рака у родственников первой линии родства. ИОР/Гр у лиц с раком у родственников составил 6,57/Гр (95%ДИ: 0,91; 18,64) в зависимости от гонадной дозы матери, $p < 0,05$. Зависимость от суммарной дозы была ниже 5,17/Гр (95%ДИ: 0,86; 15,36). При этом отличия между группами не значимы.

Таблица 6

ИОР смерти от солидных ЗНО в УКПОН от дозы на гонады родителей

[Table 6]

ERR values of solid cancer deaths in UCEPO depending on the dose to the parental gonads]

Модель [Model]	ИОР/Гр (95% ДИ) [ERR/Gy, 95% CI]	Отклонение [Deviance]	P
Доза на гонады матери [Maternal gonadal dose]			
Линейная [Linear]	0,28 (-1,03;1,59)	2797,498	> 0,5
Квадратичная [Quadratic]	0,73 (-2,07;3,52)	2797,4	> 0,5
Доза на гонады отца [Paternal gonadal dose]			
Линейная [Linear]	0,32 (-1,07;1,71)	2797,398	0,28
Квадратичная [Quadratic]	1,57 (-1,52;4,66)	2796,119	0,21
Суммарная доза на гонады родителей [Combined gonadal dose of parents]			
Линейная [Linear]	0,26 (-0,63;1,15)	2797,283	0,5
Квадратичная [Quadratic]	0,55 (-0,8;1,9)	2796,664	0,31

Таблица 7

ИОР смерти от ЗНО легких в УКПОН от дозы на гонады родителей

[Table 7]

ERR values of mortality from lung cancer in UCEPO depending on the dose to the parental gonads (linear and quadratic models)]

Модель [Model]	ИОР/Гр (95% ДИ) [ERR/Gy, 95% CI]	Отклонение [Deviance]	p
Доза на гонады матери [Maternal gonadal dose]			
Линейная [Linear]	4,36 (0,15; 13,48)	501,764	0,038
Квадратичная [Quadratic]	9,81 (0,35; 31,55)	501,672	0,036
Доза на гонады отца [Paternal gonadal dose]			
Линейная [Linear]	5,39 (0,46; 15,56)	500,928	0,023
Квадратичная [Quadratic]	11,18 (0,41; 35,98)	501,623	0,126
Суммарная доза на гонады родителей [Combined gonadal dose of parents]			
Линейная [Linear]	3,95 (0,55; 12,14)	499,555	0,011
Квадратичная [Quadratic]	5,08 (0,62; 15,56)	499,487	0,01

Зависимость ИОР от возраста родителей наблюдалась только в группе с возрастом отца старше 45 лет в зависимости от дозы на гонады отца, но оценка в данном случае имела очень высокий уровень неопределённости (95%ДИ: 13,38; 179,1) и как в случае с остальными оценками также требует дальнейших исследований.

Необходимо отметить, что точечные оценки риска смерти от рака легкого на данном этапе имеют широкие доверительные интервалы и являются предварительными, при этом дозовая зависимость имеет достаточную статистическую значимость. Неопределенность оценок на данном этапе связана с относительно молодым возрастом членов когорты, а также с возможной модификацией неучтенными факторами. Для уменьшения неопределенности величины риска рака легкого необходимо продолжение наблюдения за когортой и повторный анализ при достижении потомками возраста максимальной реализации ЗНО.

Заключение

В УКПОН впервые была проведена оценка отдаленных эффектов облучения для риска смерти от всех солидных

ЗНО, в зависимости от доз на гонады родителей, и для отдельных локализаций ЗНО.

В результате анализа риска смерти от всех солидных ЗНО в зависимости от гонадных доз родителей, не было выявлено статистически значимого эффекта для всех членов когорты (получены положительные значения величин риска смерти, но статистически не значимые). Данные результаты согласуются с полученными в недавних исследованиях у потомков членов когорты LSS [8], у потомков ликвидаторов Чернобыльской аварии [7] и с выводами МКРЗ и НКДАР по данному вопросу [3-4].

В то же время, была выявлена значимая зависимость смертности от всех солидных ЗНО от дозы на гонады отца у потомков с возрастом отца на момент рождения старше 45 лет – ИОР/Гр 8,09 (95%ДИ: 0,51; 22,93), p <0,05. Похожие результаты наблюдались при оценке канцерогенных эффектов в когорте потомков ПО «Маяк», где была установлена достоверная связь онкосмертности с дозами прекоцептивного облучения, полученными отцами – работниками ПО «Маяк» – в течение шести месяцев до зачатия [17].

При оценке риска смерти от ЗНО легких была получена статистически значимая дозовая зависимость, (которая лучше описывалась линейной моделью): а) в зависимости от гонадной дозы отца, ИОР/Гр составил 5,39 (95%ДИ: 0,46; 15,56), $p=0,023$; б) от гонадной дозы матери, ИОР/Гр составил 4,36 (95%ДИ: 0,15; 13,48), $p=0,038$; в) от суммарной гонадной дозы родителей: ИОР/Гр 3,95 (95%ДИ: 0,55; 12,14), $p=0,011$. Анализ модификации эффекта показал увеличение риска ЗНО легкого у потомков, если возраст отца был старше 45 лет, в зависимости от гонадной дозы отца (статистически значимое увеличение). При этом доверительный интервал показывал большую неопределенность оценок. Аналогичная тенденция к увеличению величины риска ЗНО легкого наблюдалась у русского населения относительно татар и башкир в когорте потомков, а также у потомков, имеющих родственников первой линии с диагнозом ЗНО (различия не значимы). Подобный эффект наблюдался в когорте потомков (F1) работников ПО Маяк [17], где также отмечалось влияние гонадной дозы в сочетании с возрастом отца на риск смерти от ЗНО.

Таким образом, несмотря на наличие доли неопределенности в точечных оценках риска смерти от рака легкого, в исследовании получены важные результаты, доказывающие дозовую зависимость смерти от солидных ЗНО у мужчин и смерти от рака легкого у мужчин, связанные с гонадными дозами родителей.

Необходимо подчеркнуть, что, УКПОН имеет большой потенциал для изучения отдаленных последствий на здоровье потомков облученного населения в будущем, связанный с увеличением возраста потомков, и реализацией случаев заболеваний и смертей, связанных с возрастом и оценкой влияния неучтенных факторов риска на данном этапе (в частности курения), что уменьшит существующие неопределенности.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Завьялов Д.А. – анализ риска, обсуждение результатов, написание статьи.

Крестинина Л.Ю. – дизайн исследования, анализ риска, интерпретация данных, подготовка разделов статьи.

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам биофизической лаборатории УНПЦ РМ (М.О. Дегтевой, Е.А. Шишкиной, Е.И. Толстых) за расчет оценок индивидуальных доз для членов когорты потомков, а также сотрудникам отдела Базы данных «Человек» УНПЦ РМ под руководством Старцева Н.В. за обновление данных о местах проживания, жизненном статусе и причинах смерти членов когорты потомков облученного населения, а также сотрудникам эпидемиологической лаборатории и лично Епифановой С.Б. за подготовку аналитических файлов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. Дуброва Ю.Е. Индукция мутаций в половых клетках человека и мышей // Генетика. 2016. Т. 52, № 1. С. 24-36. DOI: 10.7868/S0016675816010033.
2. Ослина Д.С., Рыбкина В.Л., Азизова Т.В. Передача радиационно-индуцированной геномной нестабильности от облученных родителей потомкам // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67, № 4. С. 10–18. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-4-10-18.
3. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2013 Report. Volume II. Scientific annex B: Effects of radiation exposure of children. New York, 2013. 284 p.
4. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.:ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
5. Little M.P., Goodhead D.T., Bridges B.A., Bouffler S.D. Evidence relevant to untargeted and transgenerational effects in the offspring of irradiated parents // Mutation Research. 2013. Vol. 753, № 1. P. 50-67. DOI: 10.1016/j.mrrev.2013.04.001.
6. Соснина С.Ф., Сокольников М.Э. Наследуемые эффекты у потомков, связанные с вредным воздействием на родителей (Обзор литературы) // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 84-95. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-84-95.
7. Кочергина Е.В., Горский А.И., Чекин С.Ю. и др. Радиационно-эпидемиологическое исследование заболеваемости потомков первого поколения участников ликвидации последствий аварии на чернобыльской атомной электростанции // Радиация и риск. 2021. Т. 30, № 1. С. 110-130. DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-1-110-130.
8. Ozasa K., Grant E.J., Kodama K. Japanese Legacy Cohorts: The Life Span Study Atomic Bomb Survivor Cohort and Survivors' Offspring // Journal of epidemiology. 2018. Vol. 28, № 4. P. 162–169. DOI: 10.2188/jea.JE20170321.
9. Ozasa K., Cullings H.M., Ohishi W., et al. Epidemiological studies of atomic bomb radiation at the Radiation Effects Research Foundation // International Journal of Radiation Biology. 2019. Vol. 95, № 7. P. 879-891. DOI: 10.1080/09553002.2019.1569778.
10. Kossenko M.M., Ostroumova Y., Akleyev A., et al. Mortality in the offspring of individuals living along the radioactively contaminated Techa River: a descriptive analysis // Radiation and Environmental Biophysics. 2000. Vol. 39, № 4. P. 219-225. DOI: 10.1007/s004110000074.
11. Аклеев А.В., Киселев М.Ф. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча. 2. изд., испр. и доп. М.: Медбиоэкстрем, 2001. 530 с.
12. Крестинина, Л.Ю., Шалагинов С.А., Старцев Н.В. Уральская когорта потомков облученного населения // Вопросы радиационной безопасности. 2022. № 4 (108). С. 86-94.
13. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I., et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose From Environmental Exposures // Health Physics. 2019. Vol. 117, № 4, P. 378–87. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
14. Preston D.L., Lubin J.H., Pierce D.A., McConney M.E. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosof International Company, 1993.
15. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. и др. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017 // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 6–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
16. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1950–2019 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 19-31. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31.

17. Тельнов В.И., Кабирова Н.Р., Окатенко П.В. Оценка влияния радиационных и нерадиационных факторов на канцерогенный риск у потомков (F1, дети) работников ПО

"Маяк", подвергшихся прекоцептивному облучению // Вопросы радиационной безопасности. 2020. № 1 (97). С.76-86.

Поступила: 24.11.2023

Завьялов Данила Александрович – младший научный сотрудник, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

ORCID: 0009-0005-8754-1655

Крестинина Людмила Юрьевна – кандидат медицинских наук, заведующая эпидемиологической лабораторией, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России.

Адрес для переписки: 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ludmila@urcrm.ru

ORCID: 0000-0003-0497-5879

Для цитирования: Завьялов Д.А., Крестинина Л.Ю. Риск смерти от злокачественных новообразований в Уральской когорте потомков облученного населения // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 39–48. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-39-48

Cancer mortality risk in the Urals Cohort of Exposed Population Offspring

Danila A. Zavyalov, Lyudmila Yu. Krestinina

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

The objective of the study is to analyze solid cancer mortality and estimate the risk value of solid cancer mortality in the offspring of parents irradiated in the Southern Urals, depending on the dose to the parents' gonads as well as to conduct a preliminary assessment of the mortality risk from cancer of individual locations depending on the gonadal dose. The issue of the transgenerational effects of the human gonad exposure is still very important. There exists conclusive evidence of the presence of such effects in experimental animals. However, there is no proof of the existence of these effects in humans despite a great number of research on this subject. International scientific community and international organizations, UNSCEAR and ICRP being among them, regard this issue as the one that has not been solved yet and requires further studies. Urals Cohort of offspring of the population exposed on the Techa River and on the territory of the East Ural radioactive trace was established in the Urals research Center for Radiation medicine in 2022. The key feature of the cohort is the exclusion of the offspring with postnatal exposure. The size of the cohort as of September 2023 is 31,154 persons. The number of person-years over the whole follow-up period from 1950 through 2020 is 1 226 380. Mean dose to the gonads of mothers of all the cohort members is 41 mGy, to those of the fathers' – 35 mGy, mean combined gonad dose is 76 mGy. Over the whole follow-up period 3,774 deaths from all causes including 284 deaths from solid cancers were registered in the cohort. The mean age of the cohort members at the end of the follow-up period was 42 years. The risk of death was analyzed using Poisson regression by the programs of the EPICURE statistical software package. Three models of dose dependence were tested: linear, quadratic, and linear-quadratic models of paternal gonadal dose, maternal gonadal dose, and total gonadal dose. Mortality risk analysis of all solid cancers in the offspring cohort showed no statistically significant effect with parental gonadal dose (we have obtained positive although statistically insignificant values of solid cancers mortality risk) which is consistent with the results of other studies in human populations. At the same time, the analysis for the first time obtained a statistically significant linear dependence of the solid cancer mortality risk in offspring with father's age over 45 years depending on the dose to the father's gonads. The excess relative risk of death was 8.09/Gy, (0.51-22.93), $p < 0.05$. Also, for the first time, evidence of dose dependence of the mortality risk of lung cancer in male offspring on maternal gonadal dose, paternal gonadal dose, and combined gonadal dose was obtained. The values of excess relative risk of lung cancer and 95% confidence intervals according to the linear model were 5.39/Gy (0.46; 15.56) from paternal gonad dose, 4.36/Gy (0.15; 13.48) from maternal gonad dose, and - 3.95/Gy (0.55; 12.14) from combined gonad dose. Point risk estimates of lung cancer at this stage are characterized by wide confidence intervals and require additional studies to assess the influence of possible effect modifiers, but with a high degree of probability indicate the presence of dose dependence of this effect. Increasing the follow-up period and attained age, will increase the number of cancers in the future and will reduce dose response uncertainties and provide more accurate estimates of the risk of death in the offspring cohort.

Key words: Urals Cohort of Exposed Population Offspring (UCEPO), excess relative risk of mortality, solid cancer, lung cancer, exposed population.

Lyudmila Yu. Krestinina

Urals Research Center for Radiation Medicine

Адрес для переписки: 68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru

Authors' personal contribution

Zavyalov D.A. – risk analysis, discussion of results, writing the article, preparing drawings.

Krestinina L.Yu. – study design, risk analysis, data interpretation, preparation of sections of the article.

Acknowledgments

We express our gratitude to the staff of the biophysical laboratory of the Ural Research Center for Radiation Medicine (M.O. Degteva, E.A. Shishkina, E.I. Tolstykh) for calculating estimates of individual doses for offspring cohort members, as well as to the staff of the Human Database department under the leadership of N.V. Startsev for updating data on residence history, vital status and causes of mortality for offspring cohort members as well as to the employees of the epidemiological laboratory and personally S.B. Epifanova. for preparing the data for analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the Federal target program «Ensuring nuclear and radiation safety for 2016–2020 and for the period until 2030».

References

- Dubrova YuE. Mutation Induction in the Mouse and Human Germline. *Genetika = Genetics*. 2016;52(1): 24-36. DOI: 10.1134/S1022795416010038. (In Russian).
- Oslina DS, Rybkina VL, Azizova TV. Transmission of Radiation-Induced Genome Instability from Irradiated Parents to their Offspring. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2022;67(4): 10-18. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-4-10-18. (In Russian).
- UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2013 Report. Volume II. Scientific annex B: Effects of radiation exposure of children. New York; 2013. 284 p.
- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37 (2-4). (In Russian).
- Little MP, Goodhead DT, Bridges BA, Bouffler SD. Evidence relevant to untargeted and transgenerational effects in the offspring of irradiated parents. *Mutation Research*. 2013;753(1): 50–67. DOI: 10.1016/j.mrrev.2013.04.001.
- Sosnina SF, Sokolnikov ME. Heritable effects in offspring associated with harmful exposure to parents (Literature review). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 84-95. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-84-95.
- Kochergina EV, Gorski AI, Chekin SYu, Korelo AM, Tumanov KA, Zelenskaya NS, et al. General morbidity among children of chernobyl cleanup workers: radiation epidemiological study. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2021;30(1): 110-130. (In Russian) DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-1-110-130.
- Ozasa K, Grant EJ, Kodama K. Japanese Legacy Cohorts: The Life Span Study Atomic Bomb Survivor Cohort and Survivors' Offspring. *Journal of epidemiology*. 2018;28(4): 162–169 DOI: 10.2188/jea.JE20170321.
- Ozasa K, Cullings HM, Ohishi W, Hida A, Grant EJ. Epidemiological studies of atomic bomb radiation at the Radiation Effects Research Foundation. *International Journal of Radiation Biology*. 2019;95(7): 879-891. DOI: 10.1080/09553002.2019.1569778.
- Kossenko MM, Ostroumova Y, Akleyev A, Startsev N, Degteva M, Granath F, et al. Mortality in the offspring of individuals living along the radioactively contaminated Techa River: a descriptive analysis. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2000;39(4): 219-225. DOI: 10.1007/s004110000074.
- Akleyev AV, Kiselev MF. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa River. 2nd ed. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 530 p. (In Russian).
- Krestinina LYu, Shalaginov SA, Startsev NV. Urals cohort of exposed population offspring. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of radiation safety*. 2022;4(108): 86-94. (In Russian).
- Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387.
- Preston D, Lubin JH, Pierce DA, McConney ME. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993.
- Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 6-17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
- Krestinina LYu, Silkin SS. Solid cancer mortality risk in the Southern Urals populations exposed to radiation cohort: 1950–2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 19-31. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31.
- Telnov VI, Kabirova NR, Okatenko PV. Assessment of the effect of radiation and non-radiation factors on cancer risk in offspring (F1, children) of Mayak PA workers exposed to preconception radiation. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of radiation safety*. 2020;1(97): 76-86. (In Russian).

Received: November 24, 2023

Danila A. Zavyalov – researcher of epidemiological laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0009-0005-8754-1655

For correspondence: Lyudmila Yu. Krestinina – Candidate of Medical Sciences, head of the epidemiological laboratory of Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (68A, Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru)

ORCID: 0000-0003-0497-5879

For citation: Zavyalov D.A., Krestinina L.Yu. Cancer mortality risk in the Urals Cohort of Exposed Population Offspring. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P.39-48. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-39-48

Разработка и обоснование метода представления радиационных рисков, связанных с медицинским облучением пациентов

Л.В. Репин, Р.Р. Ахматдинов, А.М. Библин, Н.М. Вишнякова

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

При обосновании проведения диагностических рентгенологических исследований и оптимизации радиационной защиты пациентов при медицинском облучении применяется методология оценки радиационных рисков. Практическая реализация рискованного подхода зачастую уходит в одну из двух крайностей: либо чрезмерное упрощение методологии, либо чрезмерное же ее усложнение. Примером чрезмерно упрощенного подхода является оценка радиационного риска пациентов с помощью эффективной дозы и коэффициентов радиационного ущерба (коэффициентов номинального риска), приведенных в НРБ-99/2009. Примером необоснованно детализированного подхода можно считать таблицы 1–2, приведенные в МР 2.6.1.0215-20 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований», в которых указаны «значения пожизненного риска смерти с учетом вреда от снижения качества жизни по причине рака различных органов и тканей и наследственных эффектов при проведении медицинских исследований» для большого перечня медицинских диагностических рентгенологических исследований в пятилетних половозрастных группах пациентов. Главными недостатками упрощенного подхода можно считать отсутствие различий в оценке риска у лиц различного пола и возраста, хотя факт более высокой радиочувствительности у детей по сравнению со взрослыми и у женщин по сравнению с мужчинами можно считать общепризнанным. Подход к оценке риска, предложенный в МР 2.6.1.0215-20, лишен указанных недостатков. Однако, на взгляд авторов настоящего исследования, предлагает неоправданно детализированную картину с учетом неопределенностей, присущих оценкам риска в диапазоне малых доз, а также неопределенностям метода межпопуляционного переноса радиационного риска, предложенного Международной комиссией по радиологической защите. Цель настоящего исследования заключалась в разработке и обосновании более простого и наглядного метода представления информации о радиационных рисках, связанных с проведением медицинских рентгенологических исследований, лишенного основных недостатков двух вышеуказанных методов. Для достижения указанной цели был осуществлен расчет радиационных рисков по двум методикам (с использованием эффективной дозы и с использованием модели риска Международной комиссии по радиологической защите). Был проведен сравнительный анализ результатов расчета с оценками, представленными в таблицах 1–2 МР 2.6.1.0215-20. В результате проведенного анализа был разработан оригинальный прикладной метод наглядного представления качественной характеристики радиационных рисков для использования при назначении рентгенологических исследований и информировании пациентов о возможном риске для здоровья. Практический выход исследования заключается в формировании таблицы радиационных рисков, связанных с проведением исследований пациентам из российской популяции, с использованием разработанного метода представления информации о радиационных рисках.

Ключевые слова: радиационный риск, эффективная доза, медицинское облучение, радиационный ущерб, рентгенологические исследования, информирование пациента.

Введение

В основе современной системы радиационной защиты лежит т.н. линейная беспороговая гипотеза, предполагающая отсутствие минимального дозового порога индукции стохастических эффектов облучения у человека [1] и линейную зависимость суммарного вреда для здоровья, связанного с воздействием ионизирующих излучений (далее – ИИ), от дозы облучения. Такой подход применяется для управления рисками в диапазоне малых и очень малых доз [2] и/или малых мощностей доз облучения.

Расширение сфер использования ИИ в различных областях деятельности человека потребовало разработ-

ки эффективных методов учета и контроля доз облучения населения, пригодных для управления рисками для здоровья, т.е. для их снижения до «приемлемого» уровня. И одной из важнейших прикладных задач, решенных в 80-х годах прошлого века, стала разработка обобщенного показателя, пригодного для использования в качестве меры риска при различных сценариях воздействия малых доз ИИ на человека.

Таким показателем стала *эффективная доза*. К достоинствам эффективной дозы относятся такие ее особенности, как простота вычисления, универсальность использования и аддитивность значений. Эффективная доза позволяет сравнивать отсроченные вероятностные

Репин Леонид Викторович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: l.repin@niirg.ru

негативные последствия облучения для здоровья различных групп населения, независимо от ситуации, геометрии и сценария облучения, а также категории облучаемых лиц. При этом вычисление эффективной дозы связано с простейшими арифметическими действиями при известных органных дозах.

Платой за удобство, универсальность и простоту эффективной дозы являются математическая нестрогость ее вычисления, сложность величины для понимания и как следствие – ошибочная оценка ее прогнозного значения. Кроме того, эффективная доза дает смещенные оценки риска при строго неравномерном облучении (таком, например, как медицинское облучение пациентов) и не учитывает изменений в картинах заболеваемости и смертности, продолжительности жизни и уровнях летальности онкологических заболеваний, произошедших за последние 30-40 лет, а изменения эти весьма существенно могут влиять на оценки риска.

За последние годы предпринимались многочисленные попытки усовершенствовать методы использования эффективной дозы при решении отдельных задач по управлению рисками, путем добавления корректирующих множителей для различных групп облучаемых лиц и т.п. [3]. Иногда предлагается и вовсе пересмотреть подходы к обеспечению радиационной безопасности населения [4]. Отдельно следует отметить попытки расчета показателей риска по методике Международной комиссии по радиологической защите (далее – МКРЗ), но вычисленных с использованием актуальных национальных медико-демографических данных [2, 5-7].

Основная цель количественной оценки радиационных рисков заключается в управлении указанными рисками при различных ситуациях и сценариях облучения. В настоящей работе сделан упор на практическое применение результатов оценки радиационного риска, связанного с проведением медицинских рентгенологических исследований. Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием лучевых методов медицинской диагностики и ростом вклада медицинского облучения в годовую коллективную дозу облучения в Российской Федерации. Медицинское облучение носит, как правило, острый характер, а некоторые виды исследований связаны с получением сравнительно высоких доз облучения (хоть и относящихся по большей части к диапазону «малых доз»).

В работе предпринята попытка компактного представления половозрастной дифференциации рисков, связанных с медицинским облучением пациентов. Результаты представления рисков можно использовать для целей обоснования назначения исследований, при котором ожидаемая польза должна превышать возможный вред для пациента, а также для целей информирования пациентов и/или их законных представителей о риске для здоровья, связанном с проведением исследования.

Цель исследования – обоснование способа представления информации о радиационных рисках, связанных с выполнением медицинских рентгенологических исследований.

Задачи исследования

1. Выполнен расчет значений показателей радиационного риска, связанного с выполнением медицинских рентгенорадиологических исследований.
2. Осуществлен сравнительный анализ результатов расчета с оценками, полученными по иным методикам.
3. Разработан метод представления результатов качественной оценки риска с помощью двумерной цветовой шкалы.
4. Сформирована таблица половозрастной дифференциации радиационных рисков, связанных с проведением медицинских рентгенорадиологических исследований пациентам из российской популяции.

Материалы и методы

В качестве показателя риска, используемого для сравнительного анализа в рамках настоящей работы, применяется пожизненный риск смерти с учётом вреда от снижения качества жизни по причине рака различных органов и тканей и наследственных эффектов при проведении медицинских исследований, использованный для оценки риска в МР 2.6.1.0215-20 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований»¹.

Для расчета значений показателей радиационного риска применена методика, описанная в Публикации 152 МКРЗ [8]. Значения показателей риска вычислялись для органных доз, рассчитанных с использованием программного обеспечения РСХМС 2.0 [9] на основе протоколов рентгенорадиологических исследований, собранных специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в больницах Санкт-Петербурга в 2015-2018 гг. [10, 11]. Риски возникновения радиогенных злокачественных новообразований (ЗНО) рассчитывались по моделям абсолютного и относительного риска для мужчин и женщин. В расчетах использовались дозы на следующие органы/ткани для мужчин и женщин: пищевод, желудок, толстая кишка, печень, легкие, мочевой пузырь, щитовидная железа, красный костный мозг. Для женщин дополнительно оценивались риски возникновения ЗНО яичников и молочной железы. Для мужчин и женщин отдельно оценивался риск возникновения ЗНО в категории «другие солидные ЗНО» путем усреднения органных доз на 13 органов в соответствии с рекомендациями Публикации 152 МКРЗ [8].

Средние значения органных доз, использованные при оценке радиационных рисков, были рассчитаны для 4 возрастных групп пациентов: 0–4 года, 5–9 лет, 10–14 лет и «взрослые». Для некоторых видов исследований младшая возрастная группа была разбита на два диапазона: до 1 года, от 1 до 5 лет.

Межпопуляционный перенос риска на российскую популяцию осуществлялся с использованием российских медико-демографических данных за 2018 г. [12, 13]. Взвешивание оценок риска, полученных по моделям абсолютного и относительного риска, осуществлялось с использованием взвешивающих коэффициентов, рекомендованных МКРЗ [8].

¹ В методике расчета рисков, использованной в настоящей работе, не учитывался вклад наследственных эффектов в суммарный вред, что не оказывает влияния на результаты и выводы работы, т.к. вклад наследственных эффектов в суммарный вред не превышает 2,3-3,6%.

Значения риска с учетом вреда от снижения качества жизни при лучевой диагностике у мужчин российской популяции, рассчитанные по трем различным методикам

[Table 1

Risk values, taking into account the harm from reduced quality of life from radiation diagnostics in the Russian male population, calculated according to three different methods]

Исследование [Examination]	МВ [CM]	Возрастная категория, лет [Age category, years]								
		0	0-4	5-9	10-14	20-24	50-54	70-74	80-84	
		0	1	5	10	20	50	70	80	
РГ ОГК [Chest X-ray]	MP [MR]		3,50E-06	3,70E-06	3,00E-06	6,90E-06	4,60E-06	1,70E-06	8,00E-07	
	ЭД [ED]	3,41E-06	3,17E-06	5,59E-06	5,57E-06	8,01E-06				
	НИ [ICRP]	2,96E-06	2,20E-06	3,25E-06	2,37E-06	5,08E-06	4,04E-06	1,89E-06	6,31E-07	
РГ ГОП [Thoracic spine X-ray]	MP [MR]		1,60E-05	2,00E-05	1,90E-05	3,10E-05	2,00E-05	7,00E-06	3,00E-06	
	ЭД [ED]	8,66E-06	1,72E-05	2,69E-05	3,16E-05	3,83E-05				
	НИ [ICRP]	6,88E-06	1,19E-05	1,59E-05	1,52E-05	2,39E-05	1,92E-05	9,01E-06	3,00E-06	
ИРЛИ (сосуды сердца) [Interventional cardiac vascular examinations]	MP [MR]	Н/Д	2,70E-04	2,20E-04	3,50E-04	8,90E-04	6,20E-04	2,60E-04	1,20E-04	
	ЭД [ED]	5,06E-04	3,35E-04	2,66E-04	3,23E-04	8,35E-04				
	НИ [ICRP]	3,14E-04	2,06E-04	1,33E-04	1,72E-04	5,87E-04	4,56E-04	2,20E-04	7,80E-05	
РС желудка [Stomach fluoroscopy]	MP [MR]		5,70E-05	4,00E-05	5,10E-05	3,30E-04	1,30E-04	3,60E-05	1,50E-05	
	ЭД [ED]	6,93E-05	6,56E-05	4,05E-05	6,37E-05	3,09E-04				
	НИ [ICRP]	6,38E-05	6,37E-05	2,58E-05	3,95E-05	2,85E-04	1,26E-04	4,28E-05	1,23E-05	
КТ ОБП (контраст) [Contrast Abdominal CT]	MP [MR]		7,20E-04	7,80E-04	8,20E-04	1,00E-03	4,20E-04	1,20E-04	5,00E-05	
	ЭД [ED]	4,43E-04	5,38E-04	6,63E-04	7,55E-04	1,01E-03				
	НИ [ICRP]	5,62E-04	6,33E-04	6,32E-04	6,94E-04	9,50E-04	4,14E-04	1,36E-04	3,66E-05	
СЦГ почек ^{99m} Tc-пентатех [Kidney ^{99m} Tc-DPTA scintigraphy]	MP [MR]		1,80E-05	1,60E-05	1,70E-05	1,90E-05	9,30E-06	2,80E-06	1,10E-06	
	ЭД [ED]	2,64E-05	2,64E-05	2,31E-05	2,59E-05	3,01E-05				
	НИ [ICRP]	1,67E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,53E-05	2,20E-05	1,43E-05	5,92E-06	1,73E-06	
СЦГ тела ¹²³ I-МИБГ [WB ¹²³ I-MIBG scintigraphy]	MP [MR]		2,80E-04	2,00E-04	1,50E-04	1,30E-04	5,80E-05	1,80E-05	7,10E-06	
	ЭД [ED]	2,62E-04	2,62E-04	2,04E-04	1,79E-04	1,33E-04				
	НИ [ICRP]	2,89E-04	2,77E-04	1,91E-04	1,49E-04	1,28E-04	6,66E-05	2,53E-05	7,51E-06	
СЦГ печени ^{99m} Tc-технефит [Liver ^{99m} Tc-labelled large colloids scintigraphy]	MP [MR]	Н/Д	1,20E-04	6,80E-05	6,50E-05	6,60E-05	2,90E-05	9,90E-06	4,60E-06	
	ЭД [ED]	1,10E-04	1,10E-04	5,28E-05	6,93E-05	6,77E-05				
	НИ [ICRP]	1,30E-04	1,22E-04	4,98E-05	5,62E-05	5,72E-05	2,23E-05	6,90E-06	1,88E-06	
СЦГ ЩЖ ^{99m} Tc-пертехнетат [Thyroid ^{99m} Tc-pertechnetate scintigraphy]	MP [MR]		1,30E-04	7,40E-05	4,80E-05	6,00E-05	2,50E-05	7,40E-06	3,10E-06	
	ЭД [ED]	2,61E-04	2,61E-04	1,73E-04	1,22E-04	1,33E-04				
	НИ [ICRP]	1,41E-04	1,35E-04	7,67E-05	4,47E-05	5,23E-05	2,31E-05	7,91E-06	2,24E-06	
ПЭТ/КТ тела ¹⁸ F-ФДГ [WB ¹⁸ F-FDG PET/CT]	MP [MR]		1,30E-03	1,00E-03	9,00E-04	7,10E-04	3,50E-04	1,20E-04	5,10E-05	
	ЭД [ED]	5,23E-04	5,23E-04	4,62E-04	4,07E-04	2,34E-04				
	НИ [ICRP]	4,76E-04	4,55E-04	3,47E-04	2,76E-04	1,81E-04	1,11E-04	4,56E-05	1,38E-05	
ПЭТ/КТ ГМ ¹¹ C-метионин [Brain ¹¹ C-methionine PET/CT]	MP [MR]	Н/Д	5,20E-04	4,40E-04	4,20E-04	3,30E-04	1,70E-04	6,50E-05	3,20E-05	
	ЭД [ED]	2,59E-04	2,59E-04	2,75E-04	2,64E-04	2,02E-04				
	НИ [ICRP]	3,29E-04	3,12E-04	2,66E-04	2,26E-04	1,94E-04	1,12E-04	4,42E-05	1,28E-05	

В таблице использованы следующие сокращения:

МВ – методика вычисления; MP – значения получены с использованием МР 2.6.1.0215-20; ЭД – значения получены с использованием эффективной дозы и коэффициентов номинального риска развития ЗНО; НИ – значения получены с использованием модели Публикации 152 МКРЗ; РГ – Рентгенография; ГОП – грудной отдел позвоночника; ОГК – органы грудной клетки; ИРЛИ – интервенционные рентгенологические исследования; РС – рентгеноскопия; КТ – компьютерная томография; ОБП – органы брюшной полости; СЦГ – сцинтиграфия; МИБГ – метайодбензилгуанидинин; ЩЖ – щитовидная железа; ФДГ – фтордезоксиглюкоза; ГМ – головной мозг.

[The following abbreviations are used in the table:

CM – calculation methodology; MR – values obtained using MR 2.6.1.0215-20; ED – values obtained using effective dose and nominal risk coefficients for malignant neoplasms; ICRP - values obtained using the ICRP Publication 152 model; CT – computed tomography; WB – whole body.]

Значения показателя REIC² рассчитывались отдельно для пациентов мужского и женского пола следующих возрастов на момент проведения исследований: 0 лет, 1 год, а также от 5 до 80 лет включительно с шагом в 5 лет. В результате выполнения расчетов были получены значения REIC для 36 половозрастных групп пациентов (по 18 возрастным группам пациентов мужского и женского пола).

Значения риска с учетом вреда от снижения качества жизни по причине рака рассчитаны по модели МКРЗ [8] на основании полученных значений REIC с использованием российских данных об уровнях пятилетней онкологической выживаемости [13].

Для оценки риска с использованием эффективной дозы применялись коэффициенты риска из Норм радиационной безопасности НРБ-99/2009³ для группы «все население» применительно к пациентам моложе 20 лет и для группы «персонал» применительно к лицам 20 лет и старше. Подобный подход используется исключительно в справочных целях и позволяет избежать существенной переоценки рисков у взрослого населения, т.к. значения коэффициентов номинального риска для группы «персонал» рассчитаны только для взрослого населения, тогда как коэффициенты риска для группы «все население» включают и оценки рисков у детей. При наличии только двух коэффициентов номинального риска подобная упрощенная методика представляется вполне оправданной для целей настоящей работы, т.к. предоставляет дополнительную информацию для анализа.

Расчеты выполнены с использованием специально разработанной программы на языке Wolfram [20].

Результаты и обсуждение

В результате выполнения расчетов были получены значения риска с учетом вреда от снижения качества жизни при лучевой диагностике у пациентов российской популяции, частично представленные в таблице 1 для пациентов мужского пола. В рамках настоящей статьи данные приведены выборочно, т.к. объем сводной таблицы достаточно велик.

Для удобства сопоставления значений риска использована цветовая шкала из МР 2.6.1.0215-20, соответствующая аналогичным группам риска.

В таблице 1 частично представлены результаты расчета и классификации значений риска с учетом вреда от снижения качества жизни при проведении лучевой диагностики у мужчин российской популяции. Для каждого вида рентгенодиагностических исследований значения риска рассчитаны тремя различными способами и представлены в трех строках, обозначенных «МР» (значения риска взяты из МР 2.6.1.0215-20 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований»), «ЭД» (значения получены с использованием эффективной дозы и коэффициентов номинального риска развития ЗНО) и «НИ» (методика настоящего исследования).

При анализе результатов расчета принимались во внимание следующие соображения:

1. оценка риска с помощью эффективной дозы не учитывает снижения риска у взрослых с возрастом;

2. более низкие значения риска в самых старших возрастных группах в значительной степени связаны с методикой расчета (т.к. большинство медико-демографических данных приводятся для категории «старше 85 лет» без детализации), с меньшим сроком реализации риска и с тем, что реализация радиогенных ЗНО возможна лишь по прошествии минимального латентного периода, что в старших возрастных группах превышает и ожидаемую продолжительность жизни, и максимальный возраст для расчета показателей.

С учетом указанных оговорок, в результате анализа результатов расчета, были сделаны следующие выводы:

1. для подавляющего большинства исследований различные методики расчета не демонстрируют существенных для целей оценки различий в классификации риска по качественным шкалам;

2. в отдельных случаях значение риска, оцененное по одной из методик, может попадать в иную категорию по сравнению с оценками по другим методикам, однако за рядом исключений это связано с близостью полученных значений к границам диапазона риска;

3. при оценке риска по методикам МР и НИ использование медико-демографических данных, а также данных об уровнях летальности онкологических заболеваний за различные календарные годы может приводить к некоторым отличиям в оценках, поэтому буквальное восприятие численных оценок риска с учетом неопределенностей, присущих указанным методикам, не способствует повышению качества принимаемых на основе этих оценок решений и может игнорироваться при решении практических задач.

В связи с вышесказанным авторами был разработан альтернативный подход к представлению результатов оценки рисков на основании сделанных расчетов. Предлагаемый способ представления разработан с учетом консервативного подхода, т.е. округления рисков в большую сторону, и представляется существенно более практичным.

Для качественной классификации рисков использованы обозначения, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Классификация и обозначение диапазонов риска

[Table 2]

Classification and labeling of risk ranges

Категория риска [Risk category]	Диапазон рисков [Risks range]	Обозначение диапазона [Range designation]
Пренебрежимый [Negligible]	$<10^{-6}$	
Минимальный [Minimal]	$10^{-6}-10^{-5}$	
Очень низкий [Very low]	$10^{-5}-10^{-4}$	
Низкий [Low]	$10^{-4}-10^{-3}$	
Умеренный [Moderate]	$10^{-3}-3 \times 10^{-3}$	

Пример представления результатов оценки риска см. в таблице 3. В указанной таблице представлены оценки

² Risk of Exposure-Induced Cancer (риск развития рака, вызванного облучением – англ.). Данный показатель пожизненного риска используется МКРЗ в качестве основы для расчета показателей популяционного риска и показателя радиационного ущерба.

³ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

Представление радиационных рисков, связанных с проведением медицинских рентгенорадиологических исследований

[Table 3

Presentation of radiation risks associated with medical X-ray examinations]

Исследование [Examination]		Возраст перехода в категорию риска, лет [Risk category change, years]																																			
		Мужчины [Males]														Женщины [Females]																					
		Дети [Children]							Взрослые [Adults]							Дети [Children]							Взрослые [Adults]														
Возраст пациента [Patient's age]:		0	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	0	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
РЕНТГЕНОГРАФИЯ [X-RAY EXAMINATIONS]	РГ Череп [Head]	45														18 55																					
	РГ ОГК [Chest]	35														35																					
	РГ ШОП [Cervical spine]	45														30 60																					
	РГ ГОП [Thoracic spine]	70														70																					
	РГ ПОП [Lumbar]	70														75																					
	РГ БП [Abdominal]	65														65																					
	РГ таза [Pelvis]	55														55																					
ФЛГ [FLG]	ФЛГ цифровая [Digital]	18 55														70																					
	ФЛГ пленочная [Screen-film]	18 25														70																					
ИРЛИ [IR]	Сосуды сердца [Cardiac vessels]	1														1																					
РС [FS]	РС Желудка [Stomach]	18 60														65																					
	РС Пищевода [Oesophagus]	5 75														5 35																					
	Ирригоскопия [Irrigoscopy]	5 18 50														5 18 50																					
КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ [COMPUTED TOMOGRAPHY]	КТ Головы [Head CT]	70														18 75																					
	КТ ОГК [Chest CT]	50														65																					
	КТ ОБП [Abdominal CT]	60														65																					
	КТ ОГК (с контрастом) [Chest CT (with contrast)]	70														18 25																					
	КТ ОБП (с контрастом) [Contrast Abdominal CT]	75														35																					
	КТ всего тела [WB CT]	70														18 75																					
	СЦИНТИГРАФИЯ [SCINTIGRAPHY]	СЦГ почек ^{99m} Tc-пентатех [Kidney ^{99m} Tc-DTPA]	65														65																				
СЦГ почек ^{99m} Tc-технемаг [Kidney ^{99m} Tc-MAG3]		70														75																					
СЦГ почек ¹²³ I-гиппуран [Kidney ¹²³ I-hippuran]		30														25																					
СЦГ тела ¹²³ I-МИБГ [WB ¹²³ I-MIBG]		35														40																					
СЦГ тела ⁶⁷ Ga-цитрат [WB ⁶⁷ Ga-citrate]		5 75														5 25																					
СЦГ скелета ^{99m} Tc-фосфаты [Skeleton ^{99m} Tc-phosphates]		18														18																					
СЦГ печени ^{99m} Tc-бромезида [Liver ^{99m} Tc-IDA]		18														18 70																					
СЦГ печени ^{99m} Tc-технефит [Liver ^{99m} Tc-labelled large colloids]		5														5 70																					
СЦГ легких ^{99m} Tc-макротех [Lung ^{99m} Tc-MAA scintigraphy]		70														70																					
СЦГ ЩЖ ^{99m} Tc-пертехнетат [Thyroid ^{99m} Tc-per technetate]		5 70														15 18 25																					
СЦГ ЩЖ ¹²³ I-NaI [Thyroid ¹²³ I-NaI]		10 35 70														10 30 55																					
ПЭТ/КТ [PET/CT]		ПЭТ/КТ всего тела ¹⁸ F-ФДГ [WB PET/CT with ¹⁸ F-FDG]	55														65																				
	ПЭТ/КТ ГМ ¹¹ C-метионин [Brain PET/CT with ¹¹ C-]	55														60																					
	ПЭТ/КТ ГМ ¹⁸ F-ФДГ [Brain PET/CT with ¹⁸ F-FDG]	15														35																					

рисков отдельно для мужчин и женщин двух возрастных категорий: «дети» и «взрослые». Оценки представлены для 33 видов рентгенодиагностических исследований. Поскольку для большинства исследований с возрастом оценки риска смещаются в диапазон более низкого риска, в ячейках указывается возраст, после которого риск переходит в такую категорию. При этом для нескольких видов исследований категория риска не меняется с возрастом или меняется более одного раза. Следует отметить, что переход из одной категории риска в другую зависит от множества индивидуальных факторов, таких, как состояние здоровья, наследственность и т.п., поэтому переходный диапазон возрастов выделен градиентом на фоне. Однако во многих случаях указана строгая граница между детьми и взрослыми, т.к. разница в рисках обусловлена различием параметров проведения исследований у детей и взрослых.

Пример работы с таблицей: при выполнении сцинтиграфии легких с использованием ^{99m}Tc -макротех оценка риска для всех четырех половозрастных групп на всем диапазоне возрастов относится к категории очень низкого риска, тогда как при выполнении сцинтиграфии щитовидной железы с препаратом ^{123}I -NaI и у мужчин, и у женщин изменение категории риска в зависимости от возраста происходит по 3 раза. Так, у девочек в возрасте 10 лет категория риска меняется с умеренного на низкий, а у взрослых женщин в возрасте 30 лет категория риска меняется с низкого на минимальный, а в возрасте 55 лет на пренебрежимый.

Предлагаемый подход к представлению риска не создает обманчивого впечатления о точности количественной оценки радиационных рисков и при этом дает практический инструмент оценки риска, объем которого в несколько раз меньше использованного в МР 2.6.1.0215-20. Разработанный способ представления данных, с одной стороны, позволяет адекватно оценить половозрастные различия в рисках, связанных с проведением медицинских рентгенодиагностических диагностических исследований, а с другой стороны, не перегружен лишней информацией, препятствующей ее адекватному восприятию, и представляется более удобным для практического использования.

Заключение

В рамках настоящего исследования были получены и проанализированы оценки радиационных рисков, связанных с проведением медицинских рентгенодиагностических исследований. В результате анализа результатов оценки риска по трем различным методикам с использованием органных доз российских пациентов и новейшей модели радиационного риска, опубликованной Международной комиссией по радиологической защите, был разработан способ компактного представления результатов оценки радиационных рисков, и сформирована таблица с результатами качественной оценки рисков для пациентов различного пола и возраста на момент проведения исследований. Разработанный метод представления результатов оценки риска предоставляет широкие возможности для использования медицинскими специалистами при назначении исследований и информировании пациентов и/или их законных представителей о риске для здоровья, связанном с рекомендуемым методом исследования.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин Л.В. – разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, осуществлял расчеты значений показателя радиационного ущерба, подготовил черновики рукописи.

Ахматдинов Р.Р. – провел поиск и анализ литературных данных, создал иллюстрации, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Библин А.М. – провел поиск и анализ литературных данных, редактировал промежуточный вариант рукописи, подготовил окончательный вариант рукописи.

Вишнякова Н.М. – провела анализ литературных данных, редактировала промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2-4. P. 332.
2. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М. и др. Характеристика радиационного риска от рентгеноскопических исследований путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 7–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17.
3. Голиков В.Ю. Оценка радиационного риска, обусловленного проведением медицинских исследований в Российской Федерации с учетом половозрастного состава пациентов // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 59-67. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-59-67.
4. Иванов В.К., Цыб А.Ф., Панфилов А.П. и др. Оптимизация радиационной защиты: «дозовая матрица». М.: Медицина, 2006. 304 с.
5. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М. и др. Характеристика радиационного риска, связанного с проведением компьютерной томографии, для российских пациентов, путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 37-45 DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-37-45.
6. Горский А.И., Чекин С.Ю., Максюттов М.А. и др. Эффект переноса моделей радиационного риска МКРЗ на популяцию РФ // Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 4. С. 5-15. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15.
7. Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Чипига Л.А. и др. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении медицинских исследований в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 56-68. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-56-68.
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152 // Annals of the ICRP. 2022. Vol. 51, No 3. P. 103.
9. Tapiovaara M., Siiskonen T. PCXMC: A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical X-ray examinations. 2nd Ed. STUK: FinalInd, 2008.
10. Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Камышанская И.Г. и др. Определение коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе для рентгеноскопических исследований желудка с бариевым контрастом для взрослых пациентов // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 93-100. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-93-100.
11. Vodovatov A., Golikov V., Kamyshanskaya I. et al. Estimation of the effective doses from typical fluoroscopic examinations with barium contrast // Radiation Protection Dosimetry. 2021. Vol. 195, No 3-4. P. 264-272. DOI: 10.1093/rpd/ncab059.

12. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019. 250 с.

13. Состояние онкологической помощи населению России в 2018 году / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019. 236 с.

Поступила: 18.07.2024

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

ORCID: 0000-0002-4857-6792

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

ORCID: 0000-0002-4151-5380

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

Вишнякова Надежда Михайловна - заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Вишнякова Н.М. Разработка и обоснование метода представления радиационных рисков, связанных с медицинским облучением пациентов // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 49–56. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-49-56

Development and justification of a method for presenting radiation risks associated with medical exposure of patients

Leonid V. Repin, Rustam R. Akhmatdinov, Artem M. Biblin, Nadezhda M. Vishnyakova

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

The practical implementation of radiation protection principles in the medical exposure of patients often tends to fall into one of two extremes: either excessive simplification of the methodology for assessing radiation health detriment, or its excessive complexity. An example of an excessively simplified approach is the assessment of radiation risk to patients using effective dose and radiation damage coefficients (nominal risk coefficients) as presented in Norms of the Radiation Safety NRB-99/2009. An example of an unjustifiably complex approach can be considered Tables 1-2 in MR 2.6.1.0215-20 "Assessment of radiation risk to patients during X-ray diagnostic radiological examinations," which indicate "lifetime risk values of death taking into account harm from reduced quality of life due to cancer of various organs and tissues and genetic effects from medical examinations" for a wide range of medical diagnostic X-ray radiological examinations in five-year age groups of patients. The main shortcomings of the simplified approach can be considered the lack of differences in risk assessment between individuals of different sexes and ages, although the fact of higher radiosensitivity in children compared to adults and in women compared to men can be considered universally recognized. The risk assessment approach proposed in MR 2.6.1.0215-20 addresses these shortcomings. However, in the view of the authors of this study, it offers an unnecessarily detailed picture considering uncertainties inherent in risk assessments at low doses, as well as uncertainties in the method of interpopulation transfer of radiation risk proposed by the International Commission on Radiological Protection. The aim of this study was to develop and justify a simpler and more straightforward method of presenting information on radiation risks associated with medical X-ray radiological examinations, free from the main drawbacks of the two aforementioned methods. To achieve this goal, radiation risks were calculated using two methods (using effective dose and using the risk model of the International Commission on Radiological Protection). A comparative analysis of the calculation results was conducted with estimates presented in Tables 1-2 of MR 2.6.1.0215-20. As a result of the analysis, an original applied method for presenting qualitative characteristics of radiation risks was developed for use in

Leonid V. Repin

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

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

prescribing X-ray radiological examinations and informing patients about potential health risks. The practical outcome of the study is the formation of a table of radiation risks associated with conducting studies on patients from the Russian population, using the developed method of presenting information on radiation risks.

Key words: radiation risk, effective dose, medical exposure, radiation detriment, X-ray examinations, patient information.

Authors' personal contribution

Repin L.V. developed design of the study, determined aims and objectives, performed calculations of radiation detriment indicator values, prepared draft of the manuscript.

Akhmatdinov R.R. searched and analyzed literature data, created figures, edited the draft of the manuscript

Biblin A.M. searched and analyzed literature data, edited the draft versions of the manuscript, presented the final version of manuscript for submission.

Vishnyakova N.M. analyzed literature data, edited the draft versions of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

The study was performed within framework of research project "Development and scientific justification of applied methods for assessment of radiation risks to public health under different situations and exposure scenarios based on modern approaches to radiation detriment assessment".

References

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 332.
2. Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Vodovatov AV, Shatskiy IG. Using disability-adjusted life years measure for characterization of radiation risk from fluoroscopy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 7–17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17.
3. Golikov VYu. Evaluation of the radiation risk of medical examinations in the Russian Federation taking into account the age and sex distribution of the patients. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(1): 59–67. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-59-67.
4. Ivanov VK, Tsyb AF, Panfilov AP, Agapov AM. Optimization of radiation protection: "Dose matrix". Moscow: Medicine; 2006. 304 p. (In Russian).
5. Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Vodovatov AV, Chipigina LA, Shatskiy IG. Characterization of radiation risk associated with computed tomography for the Russian patients using disability-adjusted life years measure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 37–45. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-37-45.
6. Gorski AI, Chekin SYu, Maksyutov MA, Menyaylo AN, Korelo AM, Tumanov KA, et al. Transfer of ICRP models of radiation risk to the population of the Russian Federation. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2019; 28(4): 5–15 (In Russian) DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15.
7. Golikov VYu, Vodovatov AV, Chipigina LA, Shatskiy IG. Evaluation of radiation risk for patients undergoing medical examinations in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 56–68 (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-56-68.
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152. *Annals of the ICRP*. 2022;51(3): 103.
9. Tapiovaara M, Siiskonen T. PCXMC: A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical X-ray examinations. 2nd Ed. STUK, Finland; 2008.
10. Vodovatov AV, Golikov VYu, Kamyshanskaya IG, Zinkevich KV, Bernhardsson Ch. Estimation of the conversion coefficients from dose-area product to effective dose for barium meal examinations for adult patients. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 93–100 (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-93-100.
11. Vodovatov A, Golikov V, Kamyshanskaya I, Cheremysyn V, Zinkevich K, Bernhardsson K. Estimation of the effective doses from typical fluoroscopic examinations with barium contrast. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;195(3-4): 264–272. DOI: 10.1093/rpd/ncab059.
12. Malignant tumors in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Moscow; 2019. 250 p. (In Russian).
13. The state of oncological care for the population of Russia in 2018. Moscow; 2019. 236 p. (In Russian).

Received: July 18, 2024

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

ORCID: 0000-0002-4857-6792

Rustam R. Akhmatdinov – engineer-researcher, information-analytical center, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-4151-5380

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

Nadezhda M. Vishnyakova - Deputy Director for Scientific Work, 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: Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Vishnyakova N.M. Development and justification of a method for presenting radiation risks associated with medical exposure of patients. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 49-56 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-49-56

Риск смерти от гемобластозов в Уральской когорте аварийно облученного населения

Л.Ю. Крестинина

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

Результаты исследования отдаленных эффектов облучения населения на Южном Урале в 1950-х годах долгое время были основаны на изучении последствий облучения в когорте реки Течи и позже в когорте Восточно-Уральского радиоактивного следа. После создания Уральской когорты аварийно-облученного населения, объединяющей лиц, облученных в двух авариях в период с 01.01.1950 по 31.12.1960 годы на Южном Урале, численность когорты увеличилась в 2 раза, период наблюдения достиг 71 года, а число человеко-лет под риском увеличилось до 1 964 333. Средняя доза на красный костный мозг всех членов когорты составила 231 мГр. Регрессионный анализ с использованием простой параметрической модели избыточного относительного риска был проведен с помощью статистического пакета EPICURE. В результате анализа было получено подтверждение статистически значимой ($p < 0,001$) линейной зависимости смертности от всех гемобластозов, и лейкозов от дозы. Избыточный относительный риск смерти и 95% доверительные интервалы при 2-летнем латентном периоде от всех гемобластозов составили 0,71/Гр (0,28;1,31); от всех лейкозов – 1,28/Гр (0,55-2,39) и от лейкозов с исключением хронического лимфолейкоза – 1,52/Гр (0,64-2,94). При этом квадратичная модель также значимо описывала дозовую зависимость, (различия между моделями были не значимы). Увеличение периода наблюдения до 71 года привело к незначительному уменьшению оценок риска. Ширина доверительных интервалов показателей риска уменьшилась более, чем в 3 раза относительно ранних исследований в когорте реки Течи, что указывает на уменьшение неопределенностей оценок риска. Увеличение численности когорты позволило получить значимые величины риска для отдельных групп населения (по полу, возрасту и др.). Анализ модификации величин риска не выявил значимых различий дозовой зависимости от исследуемых факторов, включая достигнутый возраст и возраст на начало наблюдения. Исследование будет продолжено для более детального изучения влияния временно-зависимых факторов на дозовую зависимость, а также для оценки риска смерти от отдельных клеточных форм лейкозов.

Ключевые слова: лейкоз, гемобластозы, избыточный относительный риск, риск смерти, хроническое облучение, Уральская когорта аварийно-облученного населения, УКАОН.

Введение

Оценка величин радиогенного риска при хроническом облучении в диапазоне преимущественно низких или средних доз остается дискуссионной в связи с проблемами недостаточной статистической силы исследований, которая наряду с численностью когорты и частотой исследуемого эффекта напрямую связана с величиной дозы. В связи с этим величины риска здоровью, полученные в когортных исследованиях при длительном наблюдении играют важную роль в накоплении полученных знаний.

Результаты исследования, представленные в данной работе, являются продолжением серии публикаций по анализу радиогенного риска в Уральской когорте аварийно-облученного населения (УКАОН), объединяющей лиц, облученных при проживании в прибрежных селах реки Течи и на территории Восточно-уральского радиоактивного следа (ВУРС) в период с 1950 по 1960 годы [1-5]. Данная когорта сформирована на основе двух когорт, наблюдавшихся ранее отдельно. УКАОН является уникальной как по численности (около 63 тысяч человек),

так и по длительности периода наблюдения (с 1950 по 2020 годы). Достоинством когорты также является факт "невыбранного населения", наличие лиц обоего пола, всех возрастов, разного исходного уровня здоровья, разных социальных групп. Большая доля лиц, получивших низкие дозы облучения, сопоставимые с фоновыми уровнями, позволяет использовать внутренний контроль для оценки эффектов облучения.

Цель исследования - получение прямых оценок риска смерти от злокачественных новообразований лимфатической и кроветворной тканей (далее именуемые как гемобластозы) за период наблюдения с 1950 по 2020 годы. На первом этапе анализа величины избыточного относительного риска (ИОР) смерти оцениваются суммарно для всех гемобластозов, а также для всех лейкозов с включением и исключением случаев смерти от хронического лимфолейкоза (ХЛЛ), зависимость которого от радиационного воздействия во многих исследованиях не находит подтверждения [6-8], включая исследования в когорте реки Течи [9-11]. Оценка ИОР от отдельных клеточных форм лейкозов будет описана в следующих публикациях.

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ludmila@urcrim.ru

Материалы и методы

Определение когорты

Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН) включает в себя лиц, облученных на территории Челябинской и Курганской областей в период с 01.01.1950 по 31.12.1960 гг. в результате двух радиационных ситуаций (планового и аварийного сброса радиоактивных отходов в реку Течу и образования Восточно-уральского радиоактивного следа в результате теплового взрыва в хранилище радиоактивных отходов) [1]. В англоязычной литературе данная когорта называется - “South Urals population exposed to radiation” (SUPER) cohort.

Численность когорты по данным на 2023 г. составляет 62652 человека, что немного отличается от численности в предыдущих работах и связано с уточнением мест проживания членов когорты в период с 1950 по 1960 годы.

Территория наблюдения (ТН) за смертностью включает всю Челябинскую и Курганскую области, период наблюдения составляет 71 год, с 1950 по 2020 годы включительно. Относительно последнего исследования риска лейкозов в когорте реки Течи [11], период наблюдения увеличился на 13 лет, численность когорты – более, чем в 2 раза, число человеко-лет под наблюдением также увеличилось в 2 раза и составило 1964337.

За 71 год с территории наблюдения мигрировало 18 % членов когорты, умерло 56%, 17% живы к концу 2020 года и проживают на ТН, а для 9% последний статус на ТН был известен ранее 2020 г.

Описание когорты и случаев смерти от гемобластозов

В таблице 1 представлены члены когорты и случаи смерти от гемобластозов по демографическим характеристикам.

Таблица 1

Распределение членов когорты и случаев смерти от гемобластозов по демографическим характеристикам

[Table 1

Distribution of cohort members and deaths of hemoblastoses and leukemia by demographic characteristics]

Характеристики [Characteristics]	Число человек [Persons number]	%	Гемобластозы [Hemoblastoses]	В том числе [Including]:	
				Все лейкозы [All leukemias]	ХЛЛ [CLL-chronic lymphocytic leukemia]
Мужчины [Male]	27812	44	116 (49%)	72 (51%)	18 (53%)
Женщины [Female]	34840	56	121 (51%)	70 (49%)	16 (47%)
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	17587	28	66 (28%)	34 (24%)	4 (12%)
Русские [Russians]	45065	72	171 (72%)	108 (76%)	30 (88%)
Возраст на начало облучения [Age at exposure, years]					
0-9	22195	35	62 (26%)	39 (28%)	5 (15%)
10-19	10567	17	60 (25%)	33 (23%)	3 (9%)
20-59	25423	41	110 (47%)	67 (47%)	25 (73%)
60 >	4467	7	5 (2%)	3 (2%)	1 (3%)
Вся когорта [Total]	62652	100	237 (100%)	142 (100%)	34 (100%)
Средний возраст [Mean attained age]	43,2		58,7	57,5	72,0

В когорте преобладают женщины (56%), по этническому признаку больше русского населения (72%), остальные 28% составляют татары и башкиры. В возрасте до 10 лет облучилось 35%, а старше 60- только 7% членов когорты. Средний достигнутый возраст к концу наблюдения или на дату смерти составлял во всей когорте 43 года. Средний возраст смерти для умерших от всех гемобластозов составил около 59 лет, всех лейкозов - около 58 лет, от ХЛЛ – 72 года.

За период с 1950 по 2020 годы среди членов УКАОН на ТН было зарегистрировано 237 случаев смерти от гемобластозов. Из 237 смертей лейкозы составляют 60% (142 случая), из них 34 случая относятся к ХЛЛ. Доля случаев смерти от гемобластозов, лейкозов и ХЛЛ у мужчин была немного выше (49% 51% и 53%), чем доля самих мужчин (44%) в когорте. У русского населения можно отметить большую долю смертей от ХЛЛ относительно доли самого населения (88% у 72% населения). Доля случаев смерти от всех гемо-

бластозов и лейкозов в возрасте начала облучения от 10 до 60 лет преобладала над долей численности членов УКАОН.

У членов УКАОН миеломная болезнь и лимфомы составляли 40% от всех гемобластозов (95 случаев из 237). Из 142 лейкозов 69 случаев смерти представляли острые формы, 60 случаев смерти – хронические и 13 случаев другие формы лейкозов. Лимфолейкозы составляли 39 случаев, миелолейкозы – 49, неуточненного клеточного типа – 49, также было 2 случая моноцитарного лейкоза и 3 случая – другого типа. Только 3 из 39 лимфолейкозов имели острую форму заболевания, а 34 (87%) приходилось на ХЛЛ. Среди миелолейкозов доля хронических и острых форм составляла 53% и 40% соответственно. Относительно большое число (49 случаев) смертей наблюдалось от острого лейкоза неуточненной клеточной формы, что связано с получением информации из медицинских свидетельств о смерти, а не из историй болезни. В данной работе будет представлен

анализ дозовой зависимости риска смерти от всех гемобластозов, а также от всех лейкозов, включая и исключая случаи смерти от ХЛЛ.

Дозы

Хроническое облучение населения Южного Урала явилось следствием деятельности ПО "Маяк", приведшей к сбросам радиоактивных отходов в реку Течу, и к загрязнению территорий в результате образования Восточно-Уральского радиоактивного следа после теплового взрыва в хранилище радиоактивных отходов в 1957 году. Облучение носило комбинированный характер, внешнее облучение было обусловлено загрязнением почвы радионуклидами, а внутреннее – радионуклидами, поступившими в организм с речной водой, молоком и продуктами местного производства. Для жителей на реке Тече основными дозообразующими радионуклидами являлись долгоживущие ^{137}Cs , и ^{90}Sr , а для жителей ВУРС – две трети активности выпавшего облака были за счет редкоземельных элементов и 5,5% составлял ^{90}Sr , основные радионуклиды, поступившие внутрь – ^{144}Ce и ^{90}Sr [12].

Сотрудниками биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины была разработана единая дозиметрическая система [13], эволюционировавшая от TRDS-2000 до TRDS-2016, опирающаяся на данные об истории проживания облучавшихся лиц. Система представляет собой программный комплекс для расчета ежегодных индивидуальных доз внешнего и внутреннего облучения 23-х органов тела человека по данным об истории его проживания на загрязненных территориях, с учетом пола и возраста. При разработке дозиметрической системы был использован большой объем данных по содержанию радионуклидов в организме человека и объектах окружающей среды. Дозиметрическая система и ее развитие описаны во многих работах [12-16]. В 2022-2023 гг. были проведены усовершенствования TRDS-2016. Была уточнена базовая информация и параметры расчета доз; усовершенствован алгоритм оценки коэффициентов индивидуализации поступления ^{90}Sr в организм; переоценены коэффициенты перехода, $^{89,90}\text{Sr}$ в единицы мощности дозы на красный костный мозг (ККМ). Детально данные изменения будут описаны в отдельной публикации.

Комплекс изменений в параметрах дозиметрической системы привел к изменениям в поглощенных накопленных дозах за счет перераспределения людей внутри дозовых групп. Средняя доза облучения на ККМ в объединенной когорте составила 231 мГр (на реке Тече – 327 мГр, а на ВУРС – 26 мГр) а медианная во всей когорте – 44 мГр (на реке Тече – 162 мГр, а на ВУРС – 9 мГр). Уже к 1980 году практически все члены когорты накопили более 80% суммарной дозы на ККМ. К 1990 году этот вклад у всех превысил 95%. За весь период 57% членов когорты получили дозу на ККМ в диапазоне малых доз (до 0,1Гр), а 95% членов когорты получили дозу на ККМ до 1 Гр; около 4% получили дозу от 1 до 2 Гр и менее 1% получили дозу выше 2 Гр.

Статистические методы

Расчет величин риска смерти проводился с помощью программ DATAB и AMFIT статистического пакета EPICURE [17].

Для упрощения использования данных при моделировании базовых показателей смертности и при расчете дозовой зависимости случаи смерти и человеко-годы под риском для членов УКАОН были стратифицированы с помо-

щью программы DATAB по исследуемым параметрам и категориям. Дозовая зависимость показателей риска смерти оценивалась методом регрессии Пуассона. Для этого применялась простая параметрическая модель ИОР в программе AMFIT. Достоверность результатов и доверительные интервалы (ДИ) оценивались методом максимального правдоподобия с 95% уровнем значимости. Простая параметрическая модель ИОР описана в работе Д. Престона [17] и неоднократно – в наших предыдущих работах [2-5, 9-12].

Стратификация

Для анализа риска смерти от гемобластозов и лейкозов в УКАОН человеко-годы и случаи, были стратифицированы по следующим параметрам: пол, национальность (русские, татары и башкиры); факт эвакуации (да, нет); год рождения членов когорты (до 1937 г. или позже); календарный период (с 1950 по 10 летним интервалам по 2020 г.); возраст на начало облучения (7 категорий 0-, 10-, 20-, 30-, 40-, 50-, 60 и более лет); достигнутый возраст (9 категорий 0-, 10-, 20-, 30-, 40-, 50-, 60-, 70-, 80 и более лет); территория наблюдения (6 категорий); авария, в результате которой было облучение (река Теча, ВУРС); область проживания на начало облучения (Челябинская или Курганская), наличие родственников 1 линии родства со случаями ЗНО (нет, есть, неизвестно); сельский/городской житель (городской-если проживал в городе 10 и более лет); факт ожирения (нет, да, неизвестно); факт курения (курит, не курит, неизвестно); статус облучения (облучался только сам, дополнительно облучены родители или получено внутриутробное облучение); по дозовым категориям на ККМ (0-, 0,002-, 0,005-, 0,01-, 0,025-, 0,05-, 0,1-, 0,2-, 0,3-, 0,5-, 1,0 >); и с такими же дозовыми категориями для доз с 2-, 5-, -летними минимальными латентными периодами.

Результаты и обсуждение

Анализ зависимости базовых уровней от нерадикационных факторов

При анализе влияния отдельных факторов на базовые (при нулевой дозе) уровни смертности от всех гемобластозов суммарно, всех лейкозов и лейкозов без ХЛЛ, статистически значимая зависимость ($p < 0,05$) была выявлена от пола (более высокие показатели у мужчин), достигнутого возраста (увеличение с увеличением возраста) и фактора городской или сельской житель (более высокие показатели у сельских жителей). Дополнительно для всех гемобластозов суммарно оказывал влияние фактор год рождения членов когорты (больше у родившихся с 1937 г. и позже), а для всех лейкозов – фактор национальности (выше у русского населения). Факторы, значимо влияющие на показатели смертности для каждой группы (всех гемобластозов, лейкозов или лейкозов без ХЛЛ) были включены в модель расчета их базовых уровней смертности до оценки дозовой зависимости.

Анализ дозовой зависимости

Анализ риска смерти от всех гемобластозов, лейкозов суммарно и лейкозов без ХЛЛ был рассчитан в зависимости от дозы на ККМ.

С помощью программы AMFIT для выбора наиболее значимого минимального латентного периода (МЛП) мы провели расчеты ИОР для 0-, 2- и 5-летнего латентных периодов. Используя выбранный МЛП мы также проверили вид дозовой зависимости, применив в расчетах линейную, линейно-квадратичную и квадратичную модели (таблица 2).

Величины ИОР смерти от гемобластозов при разных латентных периодах и моделях дозовой зависимости

[Table 2

ERR mortality values of hemoblastoses at different latent periods and dose dependence models]

МЛП, лет [Minimal latent period, years]	ИОР/Гр, [ERR/ Gy]	95% ДИ [CI]	P	Избыток [Excess cases]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]	AIC
Все гемобластозы [All hemoblastoses]						
Линейная модель [Linear model]						
0	0,70	0,28; 1,28	<0,001	38,6	16,3%	3131,3
2	0,71	0,28; 1,31	<0,001	38,6	16,3%	3131,3
5	0,69	0,26; 1,28	<0,001	36,3	15,3%	3132,8
Квадратичная модель [Quadratic model]						
2	0,35	0,12; 0,68	<0,001	20,9	8,8%	3133,5
Все лейкозы [All leukemias]						
Линейная модель [Linear model]						
0	1,23	0,53; 2,3	<0,001	33,7	23,7%	2146,2
2	1,28	0,55; 2,39	<0,001	33,9	23,9%	2146,0
5	1,23	0,50; 2,33	<0,001	31,6	22,3%	2148,0
Квадратичная модель [Quadratic model]						
2	0,76	0,31; 1,43	<0,001	20,9	19,4%	2145,8
Все лейкозы без ХЛЛ [All leukemias without CLL]						
Линейная модель [Linear model]						
0	1,46	0,61; 2,82	<0,001	30,5	28,2%	1674,1
2	1,52	0,64; 2,94	<0,001	30,6	28,3%	1673,9
5	1,45	0,58; 2,84	<0,001	28,3	26,2%	1676,1
Квадратичная модель [Quadratic model]						
2	0,78	0,30; 1,52	<0,001	<0,001	16,9%	1677,7

Данные для линейно-квадратичной зависимости в таблице не указаны, т.к. ее применение не вносило улучшений относительно линейной модели ($p > 0,5$). Для сравнения значимости показателей мы использовали "Информационный критерий Акаике" (AIC) – который используется для выбора статистических моделей (чем меньше значение AIC, тем лучше модель описывает данные). А также мы обращали внимание на относительную ширину доверительного интервала, (которая равна разнице между верхней и нижней границей 95% ДИ, деленной на значение ИОР). Данный показатель был лучше при использовании линейной модели, чем квадратичной для всех видов гемобластозов.

Можно видеть, что при минимальном латентном периоде в 2 года, величина ИОР немного выше других во всех трех группах, при этом статистическая значимость всех показателей одинаково высокая ($p < 0,001$). Величина показателя AIC также почти одинаковая при всех латентных периодах, но немного лучше при использовании латентного периода в 2 года. Выбрав для анализа МЛП в 2 года, мы протестировали модели разной зависимости. Для всех локализаций (все гемобластозы или все лейкозы, или лейкозы с исключением ХЛЛ) зависимость значимо описывалась линейной моделью. Квадратичная модель во всех трех

случаях была также статистически значима, хотя линейная модель (судя по величине AIC) немного лучше описывала дозовую зависимость риска смерти от всех гемобластозов и лейкозов без ХЛЛ (при этом различия ИОР/Гр при разных моделях не достоверны). Поэтому вполне правомерно использование более простой, линейной дозовой зависимости для получения оценок ИОР смерти от гемобластозов.

По данным таблицы 2 можно также видеть, что атрибутивный риск для всех гемобластозов при 2-летнем МЛП составит 16,3%, для всех лейкозов – 23,9%, и для всех лейкозов без ХЛЛ – 28,3%. Исключение ХЛЛ из анализа увеличивает атрибутивный риск смерти от лейкозов и величину ИОР на единицу дозы в УКАОН, что косвенно подтверждает отсутствие дозовой зависимости развития смерти от ХЛЛ у населения, получившего хроническое облучение на Урале. Согласно результатам исследований, в когорте реки Течи, по анализу риска смерти и заболеваемости проведенным в 2005 г., 2010 г., и в 2013 г. через 50 и более лет после начала облучения [9-11] также не было выявлено зависимости риска ХЛЛ от дозы. Исследования последствий облучения в когорте LSS также не находят такой зависимости в отличие от результатов в Украинско-американском исследовании риска ХЛЛ среди ликвидаторов Чернобыльской аварии через 15 лет после начала облучения [18] и в некоторых

других исследованиях. Наличие данных о возможном влиянии радиации на развитие ХЛЛ указывает, что дозовую зависимость развития этой формы лейкоза необходимо также оценивать, особенно при длительном периоде наблюдения.

На рисунке дозовой зависимости смерти от лейкозов без ХЛЛ наглядно показано, что в представленном дозовом диапазоне до 2 Гр, (доза которую получили 99% членов когорты) точечные оценки ИОР в дозовых группах хорошо описываются линейной моделью, также, как и квадратичная модель лежит практически внутри доверительных интервалов линейной модели, а линейно-квадратичная модель, полностью лежит на линейной.

Модификация дозового ответа

Оценка модификации проводилась с использованием линейной модели и 2-летнего МЛП. В таблице 3 представлены результаты оценки возможной модификации дозовой зависимости смерти от гемобластозов, всех лейкозов и лейкозов без ХЛЛ нерадиационными факторами. Во всех трех группах не было выявлено статистически значимой разницы в величинах ИОР в отдельных группах. При этом можно выделить общие тенденции более высоких величин ИОР всех гемобластозов, лейкозов и лейкозов без ХЛЛ у переселенцев, в первые 35 лет после облучения (до 1986 г.), у лиц, облученных на реке Тече, у сельского населения, и у членов УКАОН, не имевших дополнительного внутриутробного облучения или облучения родителей. Тенденции к более высоким величинам ИОР связанным с воздействием дозы наблюдались также у женщин и у русского населения для всех гемобластозов и лейкозов без ХЛЛ, при включении ХЛЛ эти тенденции менялись.

Изменения дозовой зависимости ИОР смерти от всех гемобластозов и отдельных групп в связи с наличием ЗНО у родственников не наблюдалось. Не было отмечено достоверных различий в оценках ИОР в зависимости от достигнутого возраста или возраста на начало облучения для всех гемобластозов, всех лейкозов и лейкозов без ХЛЛ.

В таблице 4 представлены предыдущие оценки ИОР смерти от лейкозов, и лейкозов без ХЛЛ, опубликованные в 2005 г. для членов когорты реки Течи [9] и текущие оценки с разным периодом наблюдения. Стоит отметить, что усовершенствование дозиметрической системы, по данным сотрудников биофизической лаборатории привело к тому, что новые оценки доз на ККМ для членов УКАОН в среднем на 17% выше, чем предыдущие, что может вносить небольшой вклад в причину уменьшения величин риска. Однако, надо подчеркнуть, что качество и надежность величин ИОР, полученных в данном исследовании, значительно улучшились относительно предыдущих исследований. Относительная ширина 95% ДИ (ОШДИ) значений ИОР всех лейкозов уменьшилась почти в 2 раза. ОШДИ ИОР для когорты реки Течи составляла 2,81(=11,8/4,2), а для УКАОН за тот же период 1,53(=3,12/2,04), и за расширенный период 1,43(=1,84/1,28). Для лейкозов без ХЛЛ уменьшение неопределенности было выражено более, чем в 2 раза: аналогичные показатели были – 3,41 для когорты реки Течи, и 1,6 и 1,51 – для УКАОН.

Также выявлена тенденция (различия не достоверны) уменьшения показателей ИОР для всех гемобластозов и лейкозов с включением и исключением ХЛЛ с увеличением периода наблюдения от 50 лет до 71 года (см. ИОР/Гр в УКАОН за 1950-1999 и 1950-2020 в табл.4). Факт уменьшения величины риска с увеличением периода наблюдения отмечается и в других исследованиях [8].

Полученные оценки ИОР смерти от лейкозов согласуются и с другими исследованиями (таблица 5).

Необходимо отметить, что увеличенная численность когорты в данном исследовании позволила нам получить статистически значимые величины ИОР смерти в зависимости от пола и возраста для всех лейкозов, для лейкозов без ХЛЛ и для всех гемобластозов. Такая возможность появилась впервые, т.к. раньше на когортах меньшей численности значимых показателей для отдельных групп когорты мы получить не могли.

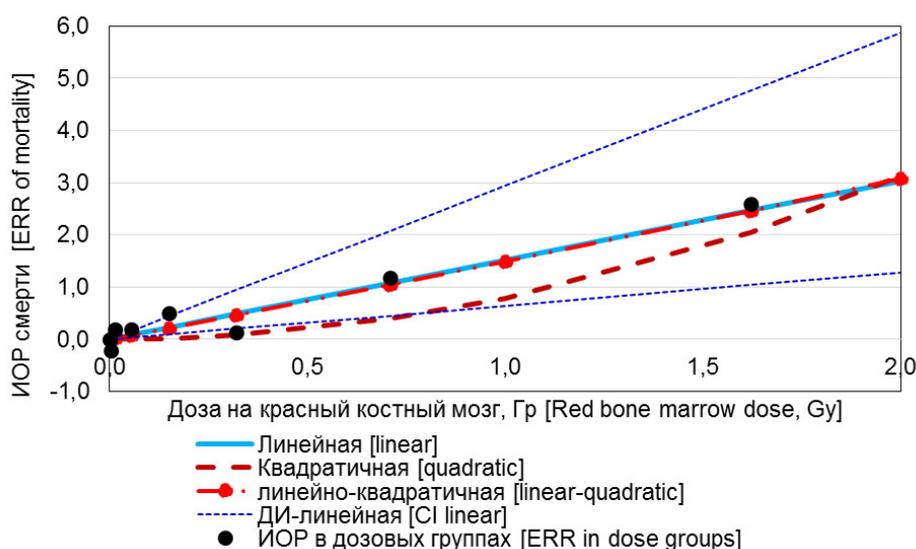


Рис. Дозовая зависимость ИОР смерти от лейкозов без ХЛЛ при использовании разных моделей [Fig. Dose dependence of the ERR of death from leukemia without CLL using different models]

Модификация величины ИОР для всех гемобластозов и всех лейкозов

[Table 3

Modification of the hemoblastoses and leukemia mortality ERR, by non-radiation factors]

Параметры [Parameters]	Все гемобластозы [All he- moblastoses]	Все лейкозы [All leukemias]	Лейкозы без ХЛЛ [Leukemia without CLL]
	ИОР/Гр (95% ДИ) [ERR/Gy (95% CI)]	ИОР/Гр (95% ДИ) [ERR/Gy (95% CI)]	ИОР/Гр (95% ДИ) [ERR/Gy (95% CI)]
Мужчины [Male]	0,58 (-0,10;1,27)	1,31 (0,34;3,10)	1,41 (0,29;3,62)
Женщины [Female]	0,85 (0,24-1,81)	1,24 (0,33;2,88)	1,62 (0,46;3,90)
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	0,53 (0,08; 1,19)	2,85 (0,74;9,33)	1,27 (0,33;2,81)
Русские [Russians]	0,96 (0,35;1,84)	0,91 (0,22;2,03)	1,85 (0,65;3,86)
Переселенные [Resettled]	0,59 (0,14;1,24)	1,18 (0,41;2,39)	1,43 (0,49;2,96)
Не переселенные [Non-resettled]	0,92 (0,29;1,81)	1,46 (0,43;3,08)	1,69 (0,47;3,73)
Рак у родственников [Cancer in relatives]			
Нет [No]	0,77 (0,23;1,52)	1,40 (0,50;2,77)	2,15 (0,92;4,13)
Есть [Yes]	0,61 (0,11;1,34)	1,04 (0,24;2,37)	0,87 (0,07; 2,29)
Нет информации [No information]	3,55 (-0,79;7,90)	3,74 (nf* <0;11,72)	0,33 (nf <0;10,57)
Календарный период, лет [Calendar period, years]			
1950-1985	1,24 (0,49;2,33)	1,65 (0,64;3,21)	1,82 (0,67;3,71)
1986 -2020	0,4 (-0,09;0,89)	0,94 (0,20;2,18)	1,20 (0,25;2,84)
Авария, приведшая к облучению [Accidents of exposure]			
Река Теча [Techa River]	0,70 (0,27;1,28)	1,27 (0,54;2,39)	1,48 (0,61;2,88)
ВУРС [EURT]	-0,70 (-4,22;2,83)	0,72 (nf <0;12,03)	-0,82 (nf <0; nf)
Городской/сельский житель [Urban/rural]			
Сельский [Rural]	0,84 (0,24;1,44)	1,63 (0,74;3,04)	1,90 (0,82;3,72)
Городской [Urban]	0,19 (-0,60;0,98)	-0,07 (nf <0;0,02)	0,07 (nf <0;2,37)
Облучение родителей [Parental exposure]			
Не облучены [not exposed]	0,81 (0,26;1,36)	1,29 (0,53;2,45)	1,55 (0,62;3,05)
Облучены [Exposed]	0,09 (-0,66;0,83)	1,16 (nf <0; 3,76)	1,34 (nf <0;4,27)
Достигнутый возраст [Attained age]			
30 лет [30 years]	1,66 (0,68;3,37)	2,77 (1,19;5,84)	2,23 (0,88;4,78)
60 лет [60 years]	0,48 (0,15;1,0)	0,9 (0,34;1,84)	1,04 (0,32;2,44)
Возраст на начало облучения [Age at exposure]			
10 лет [10 years]	0,62 (0,22;1,18)	1,2 (0,46;2,34)	1,36 (0,50;2,75)
30 лет [30 years]	1,01 (0,41;1,88)	1,4 (0,58;3,78)	1,96 (0,78;3,89)

* nf – граница доверительного интервала не может быть вычислена в связи с большой неопределённостью [Note – nf (not found), the confidence interval limit cannot be calculated due to large uncertainty]

Таблица 4

Величины ИОР смерти от гемобластозов в разные годы у облученных на Южном Урале

[Table 4

ERR values of death from hemoblastoses in different years among peoples exposed to radiation in the South Urals]

Когорта, годы [Cohort, years]	Случаи [Cases]	ИОР/Гр, (95% ДИ) [ERR/Gy, (95% CI)]	Ширина ДИ [CI width]
Все лейкозы [All leukemias]			
КРТ* [TRC], 1950-1999	61	4,2 (1,2-13,0)	11,80
УКАОИ, [SUPER cohort], 1950-1999	96	2,04 (0,88;4,0)	3,12
1950-2020	142	1,28 (0,55-2,39)	1,84
Лейкозы без ХЛЛ [Leukemia without CLL]			
КРТ* [TRC], 1950-1999	49	6,5 (1,8-24,0)	22,2
УКАОИ, [SUPER cohort], 1950-1999	76	2,4 (1,0;4,83)	3,83
1950-2020	108	1,52 (0,64-2,94)	2,3
Все гемобластозы [All hemoblastoses]			
УКАОИ, [SUPER cohort], 1950-1999	145	1,2 (0,48;2,30)	1,84
1950-2020	237	0,71 (0,28;1,31)	1,03

* КРТ – когорта реки Течи [Note – TRC – Techa River Cohort]

Таблица 5

Величины ИОР смерти от лейкозов без ХЛЛ в других исследованиях

[Table 5

ERR of leukemia, excluding chronic lymphatic leukemia (CLL)]

Автор, год, ссылка [Author, year, reference]	Случаи [Cases]	ИОР/Гр, (95% ДИ) [ERR/Gy, (95% CI)]
Daniels RD, 2012[19], Мета-анализ, без ХЛЛ [Meta-analysis, NOCLL]*	1275	1,9 (0,7-3,2)
Hsu W-L, 2013, [8], когорта LSS [LSS cohort] Линейно-квадратичная модель [LQ модель:] линейный компонент [linear component] квадратичный [quadratic]	312	0,79 (0,03; 1,93) 0,95 (0,34;49,35)
Muirhead, 2009 [20], Работники Великобритании [UK nuclear workers, NRRW**]	198	1,71 (90%:0,06-4,29)

* NOCLL -лейкозы без ХЛЛ [NOCLL – Leukemia, excluding chronic lymphocytic leukemia (CLL)]. **NRRW -национальный регистр работников ядерных производств [National Registry for Radiation Workers]

Половозрастные величины ИОР/Гр, так же, как и общие величины ИОР/Гр можно использовать при прогнозе риска смерти от гемобластозов, всех лейкозов или лейкозов без ХЛЛ для населения с аналогичным сценарием облучения (хронического, комбинированного облучения, для невыбранного населения).

Заключение

Таким образом, в представленном анализе в 2 раза увеличена аналитическая когорта, увеличен период наблюдения до 71 года, численность человеко-лет достигает почти 2 млн, общее количество случаев смерти от гемобластозов составляет 237 случаев, лейкозов – 142 случая, а лейкозов после исключения ХЛЛ – 108 случаев. Дозы на

красный костный мозг, рассчитаны по усовершенствованной дозиметрической системе TRDS-2016. Данные изменения позволили получить надежные значимые оценки риска смерти от всех лейкозов и лейкозов без ХЛЛ при хроническом облучении населения преимущественно в диапазоне доз до 1 Гр, сохраняющиеся через 71 год после начала облучения. Неопределенность величины ИОР смерти от лейкозов с включением и исключением ХЛЛ уменьшилась в 2 и более раза. Появилась возможность получения значимых оценок ИОР в зависимости от пола и возраста. Также получены значимые величины риска смерти от всех гемобластозов, которые ранее не рассчитывались.

Отмечено снижение точечных оценок риска почти в 2 раза при увеличении периода наблюдения с 50 до 70-лет

(различия не значимы), что соответствует тенденциям в других исследованиях.

Длительный период наблюдения сопоставим с периодом пожизненного риска (70 лет), рассматриваемым в работах НКДАР и МКРЗ и позволяет сравнивать эти оценки с оценками пожизненного риска при хроническом облучении в диапазоне доз до 1 Гр в УКАОН.

ИОР смерти от всех гемобластозов составил 0,71/Гр (95% ДИ: 0,64; 2,94), для всех лейкозов ИОР составил 1,28/Гр (95% ДИ: 0,55; 2,39), а для лейкозов с исключением ХЛЛ был равен 1,52/Гр (95% ДИ: 0,64; 2,94). Полученные величины ИОР сопоставимы с результатами анализа в других исследованиях при хроническом воздействии преимущественно малых доз или малой мощности доз, и при мета-анализе.

Полученные прямые оценки риска можно использовать при прогнозировании последствий хронического облучения населения при схожих сценариях облучения в диапазоне доз преимущественно ниже 1 Гр и являются хорошим дополнением в копилку знаний и количественных оценок риска лейкозов и гемобластозов при длительном облучении.

Благодарности

Выражаем благодарность М.О. Дегтевой, длительное время возглавлявшей биофизическую лабораторию УНПЦ РМ, лично Е.А. Шишкиной и Е.И. Толстых и другим сотрудникам биофизической лаборатории за предоставленные оценки индивидуальных доз на красный костный мозг, рассчитанных по усовершенствованной дозиметрической системе; коллективу отдела Базы данных «Человек» под руководством Старцева Н.В. за обновленные данные регистров медико-дозиметрической базы данных УНПЦ РМ, а также коллективу эпидемиологической лаборатории за сбор и улучшение качества информации, необходимой для эпидемиологического анализа, и лично Епифановой С.Б. за подготовку данных к анализу.

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование проведено в рамках выполнения НИР по Государственному заданию при финансовой поддержке ФМБА России в 2023 г.

Литература

- Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев Н.В., Аклеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. № 3. С. 393-402.
- Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. и др. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017 // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 6–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
- Крестинина Л.Ю., Микрюкова Л.Д., Шалагинов С.А. и др. Риск заболеваемости раком молочной железы у аварийно-облученных лиц Южного Урала // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 69-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-69-79.
- Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1950–2019 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 19-31. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31.
- Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск онкологических заболеваний репродуктивных органов у женщин Уральской когорты аварийно-облученного населения: 1956–2019 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 91-103. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-91-103.
- Richardson D., Sugiyama H., Nishi N. et al. Ionizing radiation and leukemia mortality among Japanese atomic bomb survivors, 1950-2000 // Radiation Research. 2009. Vol. 172. P. 368–382.
- Cardis E., Vrijheid M., Blettner M. et al. The 15 Country Collaborative Study of Cancer risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: estimates of radiation-related cancer risk // Radiation Research. 2007. Vol. 167. P. 396-416.
- Hsu W.-L., Preston D.L., Soda M. et al. The Incidence of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma among Atomic Bomb Survivors: 1950–2001 // Radiation Research. 2013. Vol. 179, No 3. P. 361-382. DOI: 10.1667/RR2892.1.
- Krestinina L.Yu., Preston D.L., Ostroumova E.V. et al. Protracted Radiation Exposure and Cancer Mortality in the Extended Techa River Cohort // Radiation Research. 2005. Vol. 164, № 5. P. 602–611.
- Krestinina L., Preston D.L., Davis F.G. et al. Leukemia incidence among people exposed to chronic radiation from the contaminated Techa River, 1953-2005 // Radiation Environ Biophysics. 2010. Vol. 49. P. 195-201.
- Krestinina L.Yu., Davis F.G., Schonfeld S., et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007 // British Journal of Cancer. 2013. Vol. 109. P. 2886–2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614.
- Akleyev A.V., Degteva M.O., Krestinina L.Yu. Overall results and prospects of the cancer risk assessment in the Urals population affected by chronic low dose-rate exposure // Radiation Medicine and Protection. 2022. Vol. 3, № 4. P. 159-166. DOI: 10.1016/j.radmp.2022.08.002.
- Дегтева М.О., Толстых Е.И., Воробьева М.И. и др. Дозиметрическая система реки Теча: настоящее и будущее // Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 1. С. 81–95.
- Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I. et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose From Environmental Exposures // Health Physics. 2019. Vol. 117, № 4. P. 378–87. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
- Дегтева М.О., Напье Б.А., Толстых Е.И. и др. Распределение индивидуальных доз в когорте людей, облученных в результате радиоактивного загрязнения реки Течи // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, № 3. С. 46–53.
- Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O., Napier B.A. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011) // Radiation and Environmental Biophysics. 2017. Vol. 56, № 1. P. 27-45. DOI: 10.1007/s00411-016-0677-y.
- Preston D.L., Lubin J., Pierce D., McConney. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Company. 1993. 330 p.
- Zablotska L.B., Bazyka D., Lubin J.H., et al. Radiation and the risk of Chronic Lymphocytic and Other Leukemias among Chernobyl Cleanup workers // Environmental Health Perspectives. 2013. Vol. 121, № 1. P. 59-65.
- Daniels R.D., Schubauer-Berigan. A meta-analysis of leukemia risk from protracted exposure to low-dose gamma radiation // Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2011. Vol. 68 P. 457-464. DOI: 10.1136/oem.2009.054684.
- Muirhead C.R., O'Hagan J.A., Hayloc R.G., et al. Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for radiation Workers // British Journal of Cancer. 2009. Vol. 100. P. 206-12.

Поступила: 14.12.2023

Крестинина Людмила Юрьевна – кандидат медицинских наук, заведующая эпидемиологической лабораторией, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России.
 Адрес для переписки: 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ludmila@urcrm.ru
 ORCID: 0000-0003-0497-5879

Для цитирования: Крестинина Л.Ю. Риск смерти от гемобластозов в Уральской когорте аварийно-облученного населения // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 57–66. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-57-66

Risk of death from hematological malignancies in the South Urals Population Exposed to Radiation cohort

Lyudmila Yu. Krestinina

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

The results of studies of long-term effects of population exposure in the South Urals in the 1950s were based for a long time on studies of the effects of exposure in the Techa River cohort and later in the East Urals Radioactive Trace cohort. After the creation of the South Urals Population Exposed to Radiation cohort, combining all persons exposed in the South Urals in the period from January 1, 1950, to December 31, 1960 the size of the cohort doubled, follow-up period reached 71 years, and the number of person-years at risk increased to 1,964,333. The average dose to red bone marrow for all cohort members was 231mGy. Regression analysis using a simple parametric excess relative risk model was performed using the EPICURE statistical package. The analysis resulted in confirmation of a statistically significant ($p < 0.001$) linear dose-response relationship of mortality for all hemoblastoses, and leukemia. The excess relative risk and 95% confidence intervals of death at 2-year latency period from all hemoblastoses were 0.71/Gy (0.28;1.31); from all leukemias - 1.28/Gy (0.55-2.39) and from leukemias excluding chronic lymphocytic leukemia - 1.52/Gy (0.64-2.94). The quadratic model also significantly described the dose dependence; (the differences between the models were not significant). Increasing the follow-up period to 71 years resulted in a slight decrease in risk estimates. The width of the confidence intervals of the risk estimates decreased by more than a factor of 3 compared to earlier studies in the Techa River cohort, which indicates a decrease in uncertainties of risk estimates. Increasing the size of the cohort made it possible to obtain significant risk values for individual population groups (by sex, age, etc.). Analysis of risk values modification did not reveal significant differences in dose dependence on the studied factors, including attained age and age at exposure. The study will be continued to investigate in more detail the influence of time-dependent factors on dose dependence, as well as to assess the risk of death from different cellular forms of leukemia.

Key words: leukemia, hemoblastoses, excess relative risk, risk of death, chronic exposure, South Urals Population Exposed to Radiation cohort, SUPER.

Acknowledgments

We express our gratitude to M.O. Degteva, who for a long time headed the biophysical laboratory of the Ural Research Center for Radiation Medicine, personally E.A. Shishkina and E.I. Tolstykh and other employees of the biophysical laboratory for providing estimates of individual doses to red bone marrow, calculated using an improved dosimetric system; and to the team of the Human Database department under the leadership of N.V. Startsev for updated data from the registers of the medical and dosimetric database of the URCRM, as well as to the team of the epidemiological laboratory for collecting and improving the quality of information necessary for epidemiological analysis, and personally S.B. Epifanova. for preparing the data for analysis.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out as part of the research work on the Government assignment with the financial support of the Federal Medical and Biological Agency of Russia in 2023.

References

1. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev NV, Akleyev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Medsina ekstremalnykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393-402. (In Russian).
2. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 6-17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
3. Krestinina LYu, Mikryukova LD, Shalaginov SA, Silkin SS, Epifanova SB, Akleyev AV. Breast cancer incidence risk in accidentally exposed persons of the Southern Urals. *Radi-*

Lyudmila Yu. Krestinina

Urals Research Center for Radiation Medicine

Адрес для переписки: 68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru

- atsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 69-79. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-69-79.
4. Krestinina LYu, Silkin SS. Solid cancer mortality risk in the Southern Urals populations exposed to radiation cohort: 1950–2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 19-31. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31.
 5. Krestinina Yu, Silkin SS. Cancer incidence risk of female reproductive organs in the Southern Urals Populations Exposed to Radiation Cohort: 1956-2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 91-103. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-91-103.
 6. Richardson D, Sugiyama H, Nishi N, Sakata R, Shimizu Yu, Grant EJ, et al. Ionizing radiation and leukemia mortality among Japanese atomic bomb survivors, 1950-2000. *Radiation Research*. 2009;172: 368–382.
 7. Cardis E, Vrijheid M, Blettner M, Gilbert E, Hakama M, Hill C, et al. The 15 Country Collaborative Study of Cancer risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: estimates of radiation-related cancer risk. *Radiation Research*. 2007;167: 396-416.
 8. Hsu W-L, Preston DL, Soda M, Sugiyama H, Funamoto S, Kodama K, et al. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950–2001. *Radiation Research*. 2013;179(3): 361-382. DOI: 10.1667/RR2892.1.
 9. Krestinina L.Y, Preston DL, Ostroumova EV, Degteva MO, Ron E, Vyushkova OV, et al. Protracted radiation exposure and cancer mortality in the Extended Techa River Cohort. *Radiation Research*. 2005;164 (5): 602–611.
 10. Krestinina L, Preston DL, Davis FG, Epifanova S, Ostroumova E, Ronet E, et al. Leukemia incidence among people exposed to chronic radiation from the contaminated Techa River, 1953-2005. *Radiation Environmental Biophysics*. 2010;49: 195-201.
 11. Krestinina LY, Davis FG, Schonfeld S, Preston DL, Degteva M, Epifanova S, et al. Leukemias incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007. *British Journal of Cancer*. 2013;109(11): 2886–93. DOI: 10.1038/bjc.2013.614.
 12. Akleyev AV, Degteva MO, Krestinina LYu. Overall results and prospects of the cancer risk assessment in the Urals population affected by chronic low dose-rate exposure. *Radiation Medicine and Protection*. 2022;3(4): 159-166. DOI: 10.1016/j.radmp.2022.08.002.
 13. Degteva MO, Tolstykh EI, Vorobyeva MI, Shagina NB, Anspo LR, Napier BA, et al. Techa river dosimetric system: present and future. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of radiation safety*. 2006;1: 81–95. (In Russian).
 14. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AY, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
 15. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Bougrov NG, Krestinina LYu, et al. Individual dose distribution in cohort of people exposed as a result of radioactive contamination of the Techa River. *Medical Radiology and radiation safety*. 2019;3: 46-53. (In Russian) DOI: 10.12737/article_5cf2364cb49523.98590475.
 16. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). *Radiation Environmental Biophysics*. 2017;56(1): 27-45. DOI: 10.1007/s00411-016-0677-y.
 17. Preston DL, Lubin J, Pierce D, McConney. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993. 330 p.
 18. Zablotska LB., Bazyka D, Lubin JH, Gudzenko N, Little MP, Hatch M, et al. Radiation and the risk of chronic lymphocytic and other leukemias among Chernobyl cleanup workers. *Environmental Health Perspectives*. 2013; 121(1): 59-65.
 19. Daniels RD, Schubauer-Berigan. A meta-analysis of leukemia risk from protracted exposure to low-dose gamma radiation. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2011;68: 457-464. DOI: 10.1136/oem.2009.054684.
 20. Muirhead CR, O'Hagan JA, Haylock RG, Phillipson MA, Willcock T, Berridge GLC, et al. Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for radiation Workers. *British Journal of Cancer*. 2009;100: 206-12.

Received: December 14, 2023

For correspondence: Lyudmila Yu. Krestinina – Candidate of Medical Sciences, head of the epidemiological laboratory of Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (68A, Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru)
ORCID: 0000-0003-0497-5879

For citation: Krestinina LYu. Risk of death from hematological malignancies in the South Urals Population Exposed to Radiation cohort. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 57-66. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-57-66

Содержание трития в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов

В.С. Репин, К.В. Варфоломеева, А.М. Библин, С.А. Зеленцова, К.А. Седнев, Г.В. Архангельская
 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

Места проведения мирных ядерных взрывов представляют потенциальную опасность для радиационной обстановки на территориях субъектов Российской Федерации, которая заключается в возможном выносе радиоактивности из полости взрыва в водоносные горизонты и на земную поверхность. В связи с этим важно осуществлять периодический контроль содержания техногенных радионуклидов в источниках питьевого водоснабжения населенных пунктов на территориях, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов. Предвестником возможного выноса техногенных радионуклидов является тритий. Наблюдение за его содержанием в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов и сопоставление с данными Росгидромета по Российской Федерации в целом позволяет выявить, насколько надежными являются инженерные барьеры между центральной зоной взрыва и окружающей средой с точки зрения выноса радионуклидов в водоносные горизонты. Одним из вариантов оценки надежности барьеров является оценка удельной активности трития в источниках питьевого водоснабжения. В статье представлены результаты исследования 220 проб воды, отобранных из источников питьевого водоснабжения (колодцы, скважины, родники, центральное водоснабжение) и поверхностных вод, располагающихся в границах 167 населенных пунктов 17 субъектов Российской Федерации, на территории которых в период с 1965 по 1988 год было произведено 50 мирных ядерных взрывов. Пробы были отобраны в период с мая по сентябрь 2024 года в населенных пунктах, находящихся в радиусе 30 км от мест проведения мирных ядерных взрывов. Измерения удельной активности трития проводили с помощью радиометра альфа-бета-излучения спектрометрического Quantulus 1220-003. В результате проведенных исследований выявлено, что удельная активность трития в подземных источниках водоснабжения статистически значимо (критерий Стьюдента $p < 0.05$) ниже, чем в поверхностных. Средние уровни удельной активности трития в скважинах, реках и озерах составляют 3,0; 3,45 и 4,31 Бк/кг соответственно. Удельная активность трития в источниках питьевого водоснабжения в районах проведения мирных ядерных взрывов находятся на уровне фоновых значений, регистрируемых Росгидрометом (от 1,1 до 5 Бк/кг).

Ключевые слова: мирные ядерные взрывы, тритий, удельная активность, источники питьевого водоснабжения, населенные пункты, субъекты Российской Федерации.

Tritium content in water bodies in regions of peaceful nuclear explosions

Victor S. Repin, Kseniya V. Varfolomeeva, Artem M. Biblin, Svetlana A. Zelentsova,
 Konstantin A. Sednev, Genrietta V. Arkhangel'skaya

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

Sites of peaceful nuclear explosions pose a potential radiation hazard to the territories of the Russian Federation, primarily due to the possible release of radioactivity from the explosion cavity into aquifers and onto the earth's surface. Therefore, it is essential to conduct regular monitoring of anthropogenic radionuclides in drinking water sources in settlements located near the sites of peaceful nuclear explosions. Tritium serves as an indicator of the potential release of other anthropogenic radionuclides. Monitoring its levels in water bodies in regions where peaceful nuclear explosions were performed, and comparing this data with that from Roshydromet across the Russian Federation, allows for an assessment of the reliability of the engineering barriers between the central explosion zone and the environment with respect to preventing radionuclide migration into aquifers. One method for evaluating the reliability of these barriers is the

Репин Виктор Степанович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

Viktor S. Repin

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev
Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru

assessment of tritium specific activity in drinking water sources. This article presents results of the study involving 220 water samples collected from drinking water sources (wells, boreholes, springs, central water supply systems) and surface waters within 167 settlements across 17 subjects of the Russian Federation, where 50 peaceful nuclear explosions were conducted between 1965 and 1988. The samples were collected between May and September 2024 in the settlements within a 30 km radius of a peaceful nuclear explosion site. Measurements of tritium specific activity were performed using the Quantulus 1220-003 alpha-beta spectrometric radiometer. The research revealed that the specific activity of tritium in underground water sources is significantly lower (Student's test $p < 0,05$) than in surface waters. The average specific activity levels of tritium in boreholes, rivers, and lakes were 3.0, 3.45, and 4.31 Bq/kg, respectively. The specific activity of tritium in drinking water sources within the regions of peaceful nuclear explosions was found to be at the background levels recorded by Roshydromet, ranging from 1.1 to 5 Bq/kg.

Key words: *peaceful nuclear explosions, tritium, specific activity, drinking water sources, settlements, subjects of the Russian Federation.*

Введение

В процессе реализации государственной Программы № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» на территории СССР было произведено 124 подземных ядерных взрывов. Места проведения 82 взрывов находятся на территории 19 субъектов Российской Федерации [1].

Центральные зоны (далее – ЦЗВ) мирных ядерных взрывов (далее – МЯВ) представляют собой участки недр, подвергшиеся механическому, термическому и радиационному воздействию, в которых остатки делящихся материалов ядерного заряда, долгоживущие осколки деления и активированные материалы конструкций перемешаны с тысячами тонн расплавленного грунта. Единственным защитным барьером от миграции радионуклидов из линзы расплава во внешнюю среду служат горные породы [2-6]. В связи с тем, что ЦЗВ не окружена защитными барьерами, наличие напорных вод в сочетании со старением и разрушением технологических скважин и связанных с ними конструкций является предпосылкой переноса радионуклидов, которые сохраняют потенциальную опасность в течение многих сотен лет, в водоносные горизонты и на земную поверхность с напорными подземными водами по трещиноватым зонам тектонических разломов вокруг ЦЗВ [7-10].

По степени радиационной опасности все территории объектов мирных ядерных взрывов условно разделяют на три группы:

1 – объекты МЯВ, на территории которых наблюдается выход радионуклидов на земную поверхность (Тайга, Кристалл, Глобус-1, -2, -3, -4, Кама-2, Кратон-3, Буган, Гелий, Грифон, Днепр, Вега);

2 – объекты МЯВ, в которых выход радионуклидов возможен вследствие того, что их ЦЗВ находятся под воздействием напорных водоносных горизонтов (Кварц-3, Кимберлит-1, Рубин-2, Рифт-1, Горизонт-2);

3 – объекты МЯВ, расположенные в зоне действующей или планируемой разработки недр [2].

Тритий характеризуется высокой миграционной способностью [2, 8] и легко попадает в поверхностные воды через трещиноватости полости очага взрыва [9, 11]. Поступление других техногенных радионуклидов из очагов подземных ядерных взрывов в окружающую среду происходит в процессе выщелачивания, то есть перехода из твердой фазы в жидкую. На поверхности ^3H находится преимущественно в форме тритиевой воды ТХО [12], однако на ряде участков ядерных взрывов отмечено наличие трития и в газовой фазе в соотношении газовой и водной фракции 5:2 [13].

В связи с тем, что активность ^3H даже на удалении от эпицентров взрыва на десятки километров пребывает в измеримых количествах, он является оптимальным индикатором изучения процесса миграции техногенных радио-

Introduction

In the implementation of the State Program No. 7 "Nuclear Explosions for the National Economy," 82 underground nuclear explosions were conducted on the territory of the Russian Federation across 19 regions [1].

The Central Zones of the Peaceful Nuclear Explosions (PNEs) are areas of the Earth's crust that have undergone significant mechanical, thermal, and radiological impacts. As a result of these explosions, remnants of fissile materials from the nuclear charge, long-lived fission products, and activated materials from the constructions are mixed with thousands of tons of molten rock. The primary barrier preventing the migration of radionuclides from the melt pool into the environment is the surrounding rock formations [2-6]. However, the presence of artesian waters, coupled with the aging and degradation of technological wells and associated structures, constitutes a risk for the transfer of radionuclides, which can remain hazardous for many hundreds of years. This migration can occur through artesian groundwater in fractured tectonic zones surrounding the Central Zones [7-10].

To assess radiological hazards, areas affected by peaceful nuclear explosions are conditionally classified into three groups:

1. Sites where radionuclides have been observed at the surface (e.g., Taiga, Crystal, Globus-1, -2, -3, -4, Kama-2, Kration-3, Bhutan, Gelij, Grifon, Dnepr, Vega);

2. Sites where the potential for radionuclide release exists due to the presence of artesian aquifers affecting the Central Zones (e.g., Kvarc-3, Kimberlit-1, Rubin-2, Rift-1, Gorizont-2);

3. Sites located within areas of ongoing or planned mineral resource development [2].

Tritium is characterized by its high migration capability [2, 8] and can easily enter surface waters through fractures in the explosion cavity [9, 11]. The release of other anthropogenic radionuclides from underground nuclear explosion sites into the environment occurs through leaching, that is, the transition from a solid phase to a liquid phase. On the surface, tritium is predominantly found as tritiated water (THO) [12], although at certain explosion sites, tritium has also been detected in the gaseous phase with a gas-to-water ratio of 5:2 [13].

Due to the fact that the activity of ^3H remains measurable even at distances of several tens of kilometers from explosion epicenters, it serves as an optimal indicator for studying the migration of anthropogenic radionuclides from PNE cavities into the surrounding environment via groundwater. Researching these processes allows to assess the reliability of barriers between the environment and the explosion cavity.

A review of the literature on the potential hazards of radionuclide migration from PNE cavities shows that the primary focus of research has been on analyzing the radiation situation in the immediate vicinity of nuclear explosion sites [14-29]. Special attention has been given to explosions where accidental or

нуклидов из полостей МЯВ с подземными водами в окружающей среде. Изучение этих процессов позволяет оценить степень надежности инженерных барьеров между окружающей средой и полостью взрыва.

Анализ литературы по проблеме потенциальной опасности выноса радионуклидов из полости мирного ядерного взрыва показал, что основное внимание всех исследований приковано к анализу радиационной обстановки в непосредственной близости от мест проведения МЯВ [14-29]. При этом особое место в исследованиях занимали взрывы, где вследствие их проведения имеет место аварийный или запланированный вынос радиоактивности на поверхность: Глобус-1 (Ивановская область), Тайга (Пермский край), Кристалл и Кратон-3 (Республика Саха (Якутия)) [15-20]. Важно отметить, что уровни выносимого на поверхность трития на взрывах Глобус-1 и Днепр-1, 2 достигали в разные годы десятков тысяч (до 110 000 Бк/кг) [15-17], что свидетельствует о высоких уровнях активности данного радионуклида в зонах взрывов. На объектах Кристалл и Кратон-3 содержание трития в пробах воды в разные периоды исследований находилось в пределах от 99 до 320 Бк/кг [9, 18, 19, 29]. В диапазоне от 19 до 170 Бк/кг трития зарегистрированы и для неаварийных взрывов, например, в попутной воде при добыче нефти и газа на взрыве Грифон (Пермский край) [16], а также ряде других взрывов в Республике Саха (Якутия) [10, 18].

Изучению содержания трития в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов посвящено ограниченное число исследований, как в России [15, 24-26, 29], так и за рубежом [31-33]. В основном эти публикации посвящены потенциальной опасности выхода техногенных радионуклидов из ЦЗВ МЯВ и содержат ограниченное число данных об уровнях трития в питьевой воде, потребляемой населением, проживающим в районах проведения МЯВ.

Принимая во внимание выше сказанное, следует отметить, что степень изученности всех территорий проведения МЯВ, включая территории, прилегающие к местам проведения мирных ядерных взрывов, является недостаточной. Помимо этого, нарушение в процессе старения герметичности технологических скважин и связанных с ними конструкций в ряде объектов МЯВ [2, 27], а также высокая миграционная способность трития определяют актуальность исследований его миграции в водоносные горизонты и источники питьевого водоснабжения населения, проживающего на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ.

Отнесение радиоактивных отходов, образовавшихся в результате выполнения государственной программы вооружения и государственного оборонного заказа, использования атомной энергии и ядерных зарядов в мирных целях, к особым (не извлекаемым) радиоактивным отходам^{1,2} строится на предположении, что связанные с удалением таких отходов расходы (включая расходы на их извлечение, переработку, кондиционирование, перевозку к пункту захоронения и захоронение) превышают совокупный размер

planned releases of radioactivity to the surface occurred, such as Globus-1 (Ivanovo region), Taiga (Perm region), Crystal, and Kraton-3 (Sakha Republic (Yakutia)) [15-20]. It is important to note that the levels of tritium released to the surface at the Globus-1 and Dnepr-1, 2 explosions reached tens of thousands (up to 110,000 Bq/kg) in different years [15-17], indicating high levels of activity of this radionuclide in the explosion zones. At the Crystal and Kraton-3 sites, tritium concentrations in water samples during various study periods ranged from 99 to 320 Bq/kg [9, 18, 19, 29]. Tritium levels ranging from 19 to 170 Bq/kg were also recorded for non-accidental explosions, for instance, in the associated water during oil and gas extraction at the Grifon explosion (Perm region) [16] and in several other explosions in the Sakha Republic (Yakutia) [10, 18].

There have been a limited number of studies on tritium levels in water bodies in areas where peaceful nuclear explosions were conducted, both in Russia [15, 24-26, 29] and abroad [31-33]. These publications primarily focus on the potential hazards of anthropogenic radionuclide migration from The Central Zones of the PNEs and contain limited data on tritium levels in drinking water consumed by populations living near nuclear explosion sites.

Given the above, it should be noted that the degree of research on all areas where PNEs were conducted, including territories adjacent to peaceful nuclear explosion sites, is insufficient. Additionally, the degradation of the sealing integrity of technological wells and associated structures in several PNEs sites due to aging [2, 27], along with the high migration potential of tritium underscores the relevance of studying its migration into aquifers and drinking water sources for populations living near such sites.

The classification of radioactive waste generated from the execution of state armament programs and state defense orders, as well as the use of nuclear energy and nuclear devices for peaceful purposes, as special (non-retrievable) radioactive waste^{1,2}, is based on the assumption that the costs associated with the removal of such waste (including extraction, processing, conditioning, transportation to disposal sites, and disposal) exceed the cumulative potential environmental damage in the event of the disposal of such radioactive waste at its current location. Since the potential risk of radionuclide migration beyond the explosion zone into aquifers persists, and tritium serves as an optimal indicator for studying the migration of radionuclides from PNEs into the environment via groundwater, monitoring tritium levels in drinking water sources in settlements located near PNEs sites remains highly relevant.

The aim of this study is to assess the tritium content in drinking water sources and surface waters in areas where peaceful nuclear explosions have been conducted within the territories of the Russian Federation.

Materials and Methods

The assessment of tritium content in drinking water sources and surface waters located in areas adjacent to PNEs sites was carried out in collaboration with specialists from the regional branches of the Federal Service for Surveillance on Consumer

¹ Федеральный закон от 11.07.2011 №190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Federal Law of 11.07.2011 №190-FZ «On the Management of Radioactive Waste and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation» (In Russ.)]

² Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 "О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов" [Decree No. 1069 of the Government of the Russian Federation dated October 19, 2012. On Criteria for assignment of solid, liquid and gaseous waste to radioactive waste, criteria for assignment of radioactive waste to special radioactive waste and to disposed radioactive wastes and criteria for the classification of disposed radioactive waste» (In Russ.)]

возможного вреда окружающей среде в случае захоронения таких радиоактивных отходов в месте их нахождения. Так как потенциальная опасность выноса радионуклидов за пределы зоны взрыва в водоносные горизонты сохраняется, а тритий является оптимальным индикатором изучения процесса миграции радионуклидов из полостей МЯВ с подземными водами в окружающую среду, остается актуальным контроль за его содержанием в источниках питьевого водоснабжения в населенных пунктах, расположенных вблизи от мест проведения МЯВ.

Цель исследования - дать оценку содержания трития в источниках питьевого водоснабжения и поверхностных водах в районах проведения мирных ядерных взрывов на территории субъектов Российской Федерации.

Материалы и методы

Оценка содержания трития в источниках питьевого водоснабжения и поверхностных водах, расположенных на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ, выполнена во взаимодействии со специалистами территориальных Управлений и Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора (далее ФБУЗ ЦГиЭ). В период с мая по сентябрь 2024 года специалистами Федерального бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В.Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (далее ФБУН НИИРГ им. П.В.Рамзаева) был организован отбор проб воды из источников питьевого водоснабжения (колодцы, скважины, центральное водоснабжение) и поверхностных вод в населенных пунктах, находящихся в радиусе 30 км от мест проведения МЯВ. Перечень ближайших от МЯВ населенных пунктов, предлагаемых для отбора проб, составляли с использованием ГИС-технологий. Отбор проб воды осуществляли специалисты ФБУЗ ЦГиЭ территорий, определенных Перечнем. Водные пробы отбирали в чистые стеклянные емкости, подкисляли концентрированной азотной кислотой, герметично закрывали и отправляли в испытательный лабораторный центр ФБУН НИИРГ им. П.В.Рамзаева. Всего было отобрано 220 проб воды, из которых 136 проб – из источников питьевого водоснабжения (колодцы, скважины, родники, центральное водоснабжение) и 84 – из поверхностных вод.

Пробоподготовку воды выполняли посредством дистилляции с целью очистки счетного образца от тушащих сцинтилляцию примесей и природных радионуклидов. Аликвоты полученного дистиллята объемом 9 мл помещали в пластиковые виалы, содержащие 11 мл сцинтилляционного коктейля Optiphase Hisafe III (далее сцинтиллятор). Затем виалы плотно закрывали крышкой и встряхивали в течение 2-х минут до полного смешивания дистиллята с сцинтиллятором. Перед измерением виалы выдерживали в темном и прохладном месте в течение 8-12 часов для ослабления люминесценции.

Удельная активность (далее – УА) трития определялась с помощью радиометра альфа-бета-излучения спектрометрического Quantulus 1220-003 фирмы Perkin Elmer (США). Время измерения одной пробы составляло от 3 до 24 часов. Минимальная детектируемая активность трития при времени измерений 12 часов составляла 1 Бк/кг.

Стабильность работы прибора и эффективность регистрации трития в каждой серии измерений контролировалась посредством измерения стандарта, входящего в комплект прибора, а также эталонной пробы, приготовленной

Rights Protection and Human Wellbeing and the Centers for Hygiene and Epidemiology. Between May and September 2024, specialists from the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after P.V. Ramzaev (IRH) organized water sampling from drinking water sources (wells, boreholes, centralized water supply) and surface waters in populated areas within a 30 km radius of PNEs. The List of the nearest settlements to the explosion sites for sampling was compiled using GIS technologies. Water samples were collected by specialists from the designated Centers for Hygiene and Epidemiology territories according to the List. Water samples were collected in clean glass containers, acidified with concentrated nitric acid, sealed hermetically, and sent to the Testing Laboratory Center of the IRH. A total of 220 water samples were collected, including 136 samples from drinking water supply sources (wells, boreholes, springs, central water supply) and 84 from surface water.

Water samples were prepared by distillation to purify the counting sample from quenching impurities and natural radionuclides. Aliquots of the resulting distillate, 9 ml in volume, were placed into plastic vials containing 11 ml of Optiphase Hisafe III scintillation cocktail (hereinafter referred to as the scintillator). The vials were then tightly sealed with a lid and shaken for 2 minutes until the distillate and scintillator were thoroughly mixed. Before measurement, the vials were stored in a dark and cool place for 8-12 hours to reduce luminescence.

The specific activity (SA) of tritium was determined using the Quantulus 1220-003 liquid scintillation spectrometer from Perkin Elmer (USA). The measurement time for each sample ranged from 3 to 24 hours. The minimum detectable activity of tritium at a 12-hour measurement time was 1 Bq/kg.

The stability of the instrument and the efficiency of tritium detection in each measurement series were controlled by measuring the standard included with the instrument, as well as a reference sample prepared from a tritium calibration solution in a 9:11 volume ratio with the scintillator.

Determination of tritium SA in water in the counting samples was performed according to the methodology for measuring the activity of alpha- and beta-emitting radionuclides in liquid and solid samples using the Quantulus 1220 liquid scintillation counter at the IRH, Perkin Elmer (Method Certificate No. 45014.15225/RA.RU.311243 dated December 11, 2015).

Results and discussion

During the course of this study, 220 water samples were collected from drinking water sources (wells, boreholes, springs, central water supply systems) and surface water bodies located within 167 settlements, as well as from 9 locations outside these areas. The study sites are situated in 17 regions of the Russian Federation, where 50 peaceful nuclear explosions were conducted between 1965 and 1988. Figure 1 presents a schematic map showing the locations of these PNEs, within a 30-kilometer radius of which the water samples were collected.

Table presents quantitative data on the investigated water supply sources, including the ranges and average values of tritium SA in the analyzed water samples.

Data analysis revealed that tritium concentrations in groundwater sources are significantly lower (Student's t-test $p < 0,05$) than in surface water sources. The average tritium levels in boreholes, rivers, and lakes were 3.0, 3.45, and 4.31 Bq/kg, respectively, which are three orders of magnitude lower than the intervention levels specified by NRB 99/2009³. In the areas where explosions occurred, tritium levels in rivers, lakes, and swamps feeding the rivers were within the background levels recorded by Roshydromet in these regions (ranging from 1.1 to 5 Bq/kg) [34].

из калибровочного раствора трития в объемном соотношении со сцинтиллятором 9:11.

Определение УА трития в воде в счетных образцах выполнены в соответствии с методикой выполнения измерений активности альфа-, бета-излучающих радионуклидов в жидких и твердых пробах с использованием радиометра альфа-, бета-излучения спектрометрического «Quantulus-1220» (Свидетельство об аттестации методики № 45014.15225/RA.RU.311243 от 11 декабря 2015 года).

Результаты и обсуждение

В процессе выполнения данного исследования было отобрано 220 проб воды из источников питьевого водоснабжения и поверхностных вод, располагающихся в границах 167 населенных пунктов, а также 9 точек за их пределами. Объекты исследований расположены в границах 17 субъектов Российской Федерации, на территории которых в период с 1965 по 1988 гг. было произведено 50 мирных ядерных взрывов. На рисунке 1 представлена карта-схема мест проведения МЯВ в радиусе 30 км от которых были отобраны пробы воды.

В таблице представлены количественные данные по исследованным источникам водоснабжения, диапазоны и средние значения УА трития в исследованных пробах воды.

Анализ данных показал, что содержание трития в подземных источниках водоснабжения статистически значимо ниже (критерий Стьюдента $p < 0,05$), чем в поверхностных. Средние уровни трития в скважинах, реках и озерах равны 3,0; 3,45 и 4,31 Бк/кг соответственно, что на три порядка ниже уровней вмешательства по НРБ 99/2009³. В районах проведения взрывов удельная активность трития в реках, озерах и болотах, питающих реки, находится в диапазоне фоновых уровней, регистрируемых Росгидрометом в данных районах (от 1,1 до 5 Бк/кг) [34].

Пробы воды отбирали на различных расстояниях, в связи с этим важно было выяснить, зависит ли удельная активность трития в воде подземных и поверхностных источников водоснабжения от удаленности до мест проведения МЯВ.

На рисунке 2 представлены результаты оценки УА трития в скважинах, колодцах и родниках на различных расстояниях от мест проведения МЯВ.

Анализ данных показал, что связь между удельной активностью трития в воде подземных источников и расстоянием от мирного ядерного взрыва отсутствует (рис.2). Такие данные косвенно свидетельствуют об отсутствии влияния МЯВ на содержание трития в исследованных подземных источниках питьевого водоснабжения.

На рисунке 3 представлены результаты оценки уровней активности трития в поверхностных источниках (реки, озера) на различных расстояниях от мест проведения МЯВ.

Данные, представленные на рисунке 3, показывают отсутствие связи УА трития в воде рек и озер от расстояния до мест проведения МЯВ. Более высокие уровни содержания трития в измеренных пробах воды из поверхностных источников водоснабжения по сравнению с подземными обусловлены глобальными процессами распространения трития в окружающей среде за счет предприятий атомной энергетики, космогенных процессов и промышленного применения источников на основе трития.

The distances at which water samples were collected spanned tens of kilometers. Therefore, it was important to determine whether tritium activity levels in groundwater and surface water sources depend on the distance from the sites of peaceful nuclear explosions.

Figure 2 presents the results of tritium SA assessments in wells, boreholes, and springs at various distances from the PNEs sites.

Data analysis indicated that there is no correlation between the tritium SA in groundwater and the distance from the site of the nuclear explosion (Figure 2). This finding indirectly suggests that the PNEs did not influence tritium concentrations in the groundwater sources of drinking water that were studied.

Figure 3 presents the results of assessing tritium activity levels in surface water sources (rivers, lakes) at various distances from the PNEs sites.

The data in Figure 3 show no correlation between tritium specific activity in the water of rivers and lakes and the distance from the PNEs sites. The higher tritium levels in the measured water samples from surface water sources, compared to groundwater sources, are attributed to global tritium distribution processes in the environment due to nuclear power facilities, cosmogenic processes, and the industrial use of tritium-based sources.

Conclusion

The analysis of the results of 220 water samples collected from various drinking water sources and surface waters within 167 settlements across 17 regions of the Russian Federation, in areas adjacent to 50 peaceful nuclear explosion sites, has shown the following:

1. The average tritium levels in groundwater sources are significantly lower (Student's test $p < 0,05$) than in surface water sources.
2. The average tritium levels in boreholes, rivers, and lakes are 3.0, 3.45, and 4.31 Bq/kg, respectively, which are three orders of magnitude below the intervention levels specified by NRB 99/2009.
3. No significant trends were found in the dependence of tritium levels in groundwater and surface water sources on the distance from the nuclear explosion sites. This indicates either the absence or extremely slow migration of tritium and other anthropogenic radionuclides from the epicentral zones of the explosions.
4. Tritium concentrations in drinking water sources in the areas of nuclear explosions are at background levels, as recorded by Roshydromet.

Authors' personal contribution

Repin V.S. – Proposed the research idea, participated in the organization of water sampling from the regions, contributed to data analysis, and was involved in writing the article.

Varfolomeeva K.V. – Participated in the organization of water sampling, in processing measurement results, analyzing literature data, and writing the introduction and the "Materials and Methods" section.

Biblin A.M. - Contributed to the preparation of cartographic materials, analysis of literature data, and making editorial corrections.

³ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09» (вместе с «НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы») (зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 № 14534). [Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. (In Russ.)]

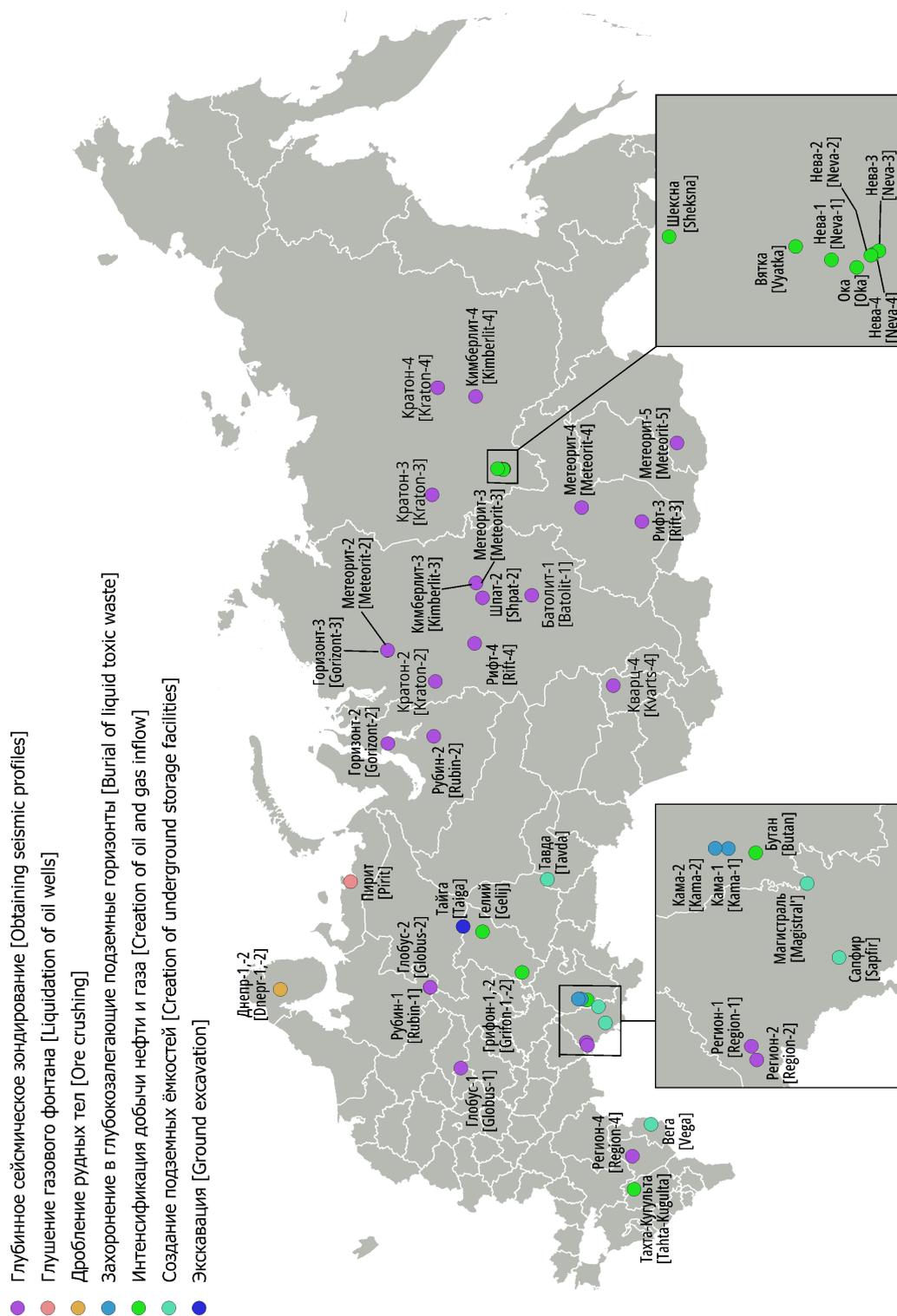


Рис. 1. Карта-схема мест проведения МЯВ, вошедших в программу данного исследования
 [Fig. 1. Location of the sites of peaceful nuclear explosions included in the research program]

Удельная активность трития в пробах воды, отобранных из разных водных объектов, расположенных в радиусе 30 км от мест проведения МЯВ

[Table

Specific activity of tritium in water samples taken from different water bodies located within a radius of 30 km from peaceful nuclear explosions sites]

Источник водоснабжения [Water Supply Source]	Количество проб, шт. [Number of Samples, pcs.]	Удельная активность, Бк/кг [Specific Activity, Bq/kg]	
		Диапазон [Range]	Среднее (ст. откл) [Mean (Std. Dev.)]
Скважина [Borehole]	48	1,11 – 5,56	3,00 (0,96)
Колодец [Well]	34	<1,00 – 5,00	3,16 (1,04)
Родник [Spring]	5	1,67 – 2,89	2,42 (0,48)
Река [River]	68	<1,00 – 6,33	3,45 (1,26)
Пруд, озеро, водохранилище [Pond, Lake, Reservoir]	15	2,96 – 6,56	4,31 (1,07)
Болото [Swamp]	1	–	2,44
Централизованное водоснабжение [Centralized Water Supply]	49	<1,00 – 7,44	2,87 (1,05)

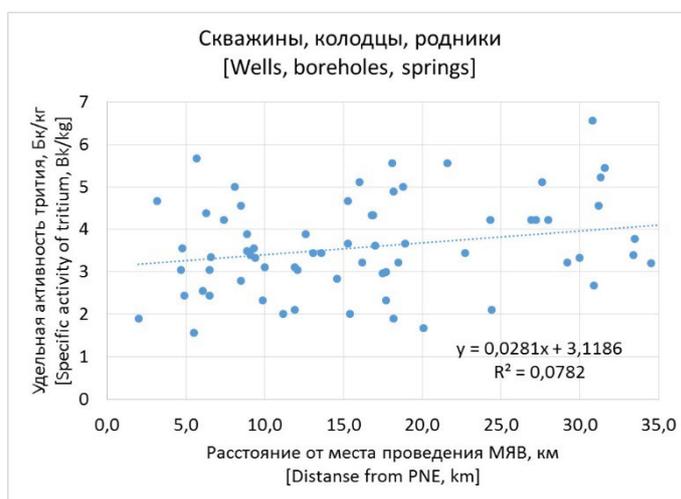


Рис. 2. Удельная активность трития в воде подземных источников, расположенных на различных расстояниях от МЯВ
[Fig. 2. The specific activity of tritium in underground water sources at various distances from the peaceful nuclear explosions' sites]

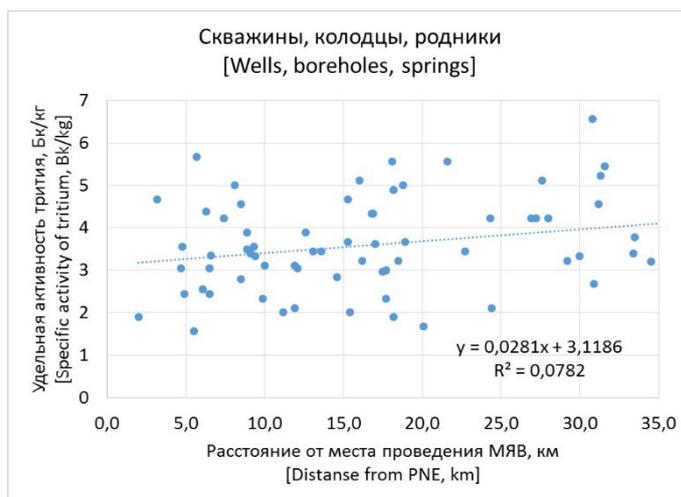


Рис. 3. Удельная активность трития в воде поверхностных источников, расположенных на различных расстояниях от МЯВ
[Fig. 3. Specific activity of tritium in the water of surface sources located at different distances from the peaceful nuclear explosions' sites]

Заключение

Анализ результатов исследования 220 проб воды, отобранных из разных источников питьевого водоснабжения и поверхностных вод, расположенных в границах 167 населенных пунктов 17 субъектов Российской Федерации, отобранных на территориях, прилегающих к местам проведения 50 МЯВ, показал:

1. Средние значения удельной активности трития в подземных источниках водоснабжения статистически значимо ниже (критерий Стьюдента $p < 0,05$), чем в поверхностных.

2. Средние значения удельной активности трития в скважинах, реках и озерах равны 3,0; 3,45 и 4,31 Бк/кг соответственно, что на три порядка ниже уровня вмешательства по НРБ 99/2009.

3. Не выявлено определенных тенденций зависимости уровней трития в подземных и поверхностных источниках от расстояния до места проведения МЯВ, что свидетельствует об отсутствии или чрезвычайно низких темпах выноса трития, а, значит, и других техногенных радионуклидов из эпицентральных зон взрывов.

4. Содержание трития в источниках питьевого водоснабжения в районах проведения МЯВ находятся на уровне фоновых значений, регистрируемых Росгидрометом в воде поверхностных водоемов и водотоков.

Сведения о личном вкладе авторов

Репин В.С. предложил идею исследования, участвовал в организации отбора проб воды из регионов, участвовал в анализе полученных данных и написании статьи.

Варфоломеева К.В. участвовала в организации сбора проб воды из регионов, в оформлении результатов измерений, анализе литературных данных, написании введения и раздела «Материалы и метода».

Библин А.М. участвовал в подготовке картографических материалов, анализе литературных данных, внесении редакционных правок.

Зеленцова С.А. участвовала в организации сбора проб воды из регионов, в оформлении результатов измерений, анализе литературных данных, написании введения и раздела «Материалы и метода».

Седнев К.А. участвовал в анализе литературных данных, подготовке проб и измерениях трития, подготовке картографических материалов.

Архангельская Г.В. участвовала в редактировании статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам ФБУЗ ЦГиЭ и Управлений Роспотребнадзора Республики Башкортостан, Республики Калмыкия, Республики Саха (Якутия), Забайкальского края, Красноярского края, Пермского края, Ставропольского края, а также Архангельской, Астраханской, Ивановской, Иркутской, Кемеровской, Костромской, Мурманской, Оренбургской, Свердловской, Тюменской областей и Ямало-Ненецкого АО за их активное участие в отборе проб и их отправке в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Zelentsova S.A. – Participated in the organization of water sampling, processing measurement results, analyzing literature data, and writing the introduction and the "Materials and Methods" section.

Sednev K.A. – Participated in the analysis of literature data, preparation of samples and tritium measurements, and preparation of cartographic materials.

Arkhangelskaya G.V. – Participated in the editing of the article.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the specialists from the regional branches of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing and the Centers for Hygiene and Epidemiology of the Republics of Bashkortostan, Kalmykia, Sakha (Yakutia), Zabaykalsky, Krasnoyarsk, Perm, and Stavropol Krai, and the Arkhangelsk, Astrakhan, Ivanovo, Irkutsk, Kemerovo, Kostroma, Murmansk, Orenburg, Sverdlovsk, Tyumen Regions, and the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug for their active participation in the sampling and dispatch of samples to the IRH.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

This article was prepared as part of the research project "Improvement and Development of Environmental Monitoring Methods in Areas of Peaceful Nuclear Explosions. Radiation and Hygienic Characterization of Drinking Water Supply Sources."

References

1. Logachev VA, ed. Nuclear explosions in the USSR and their impact on the health of the population of the Russian Federation. Moscow: Izdat Publisher; 2008. 470 p. (In Russian).
2. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Kamnev EN, Kasatkin AV, Samorodova TS. Geological and radioecological problems of the objects formed by peaceful nuclear explosions – special radwaste repositories. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2012; 113(5): 289-293. (In Russian).
3. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Myasnikov K, Klishin VI. The state of radiation safety of industrial nuclear explosions facilities conducted at fuel and energy complex enterprises in the Russian Federation. In: Proceedings of the International Conference "Problems of ensuring radiation safety in the fuel and energy complex". St. Petersburg; 2003. P. 231-237. (In Russian).
4. Lopatin VV, Ilyichev VA, Kasatkin VV. Protective measures to eliminate the consequences of the accident at the Globus-1 underground nuclear explosion facility in the Ivanovo region. In: Proceedings of the International Conference "Radioactivity after nuclear explosions and accidents": volume. 2. Radioactive pollution of the environment after nuclear explosions and accidents. Monitoring, databases, pollution fields and their dynamics. St. Petersburg: Hydrometeoizdat; 2006. P. 221-224. (In Russian).
5. Kasatkin VV, Akhunov VD, Mamonov BP, Ilyichev VA. Dynamics of contamination of the Taiga underground nuclear explosion facility and protective measures for radiation safety. In: Proceedings of the International Conference "Radioactivity after nuclear explosions and accidents": volume 2. Radioactive pollution of the environment after nuclear explosions and accidents. Monitoring, databases, pollution fields and their dynamics. St. Petersburg: Hydrometeoizdat; 2006. P. 223-225. (In Russian).
6. Vasiliev AP, Dubasov YuV, Ilyichev VA, Kasatkin VV, Myasnikov KV, Prihodko NK, et al. Nuclear explosive technologies:

**Сведения об источнике
финансирования**

Статья подготовлена в рамках выполнения НИР «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно-гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».

Литература

1. Ядерные взрывы в СССР и их влияние на здоровье населения Российской Федерации / Колл. авторов под руководством проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2008. 470 с.
2. Касаткин В.В. Георадиоэкологические проблемы объектов мирных ядерных взрывов – пунктов размещения особых радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5. С. 289-293.
3. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Мясников К.В., Клишин В.И. Состояние обеспечения радиационной безопасности объектов промышленных ядерных взрывов, проведенных на предприятиях ТЭК в Российской Федерации. Матер. конф. «Проблемы обеспечения радиационной безопасности в ТЭК», Санкт-Петербург, 8-11 апреля 2003. СПб. С. 231- 237.
4. Лопатин В.В., Ильичев В.А., Касаткин В.В. и др. Защитные мероприятия по ликвидации последствий аварии на объекте подземного ядерного взрыва Глобус-1 в Ивановской области. Сборник докладов и тезисов междунар. конф. «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий». Т. 2. Радиоактивное загрязнение окружающей среды после ядерных взрывов и аварий. Мониторинг, базы данных, поля загрязнения и их динамика. Под ред. Израэля Ю.А. СПб: Гидрометеиздат, 2006. С. 221-224.
5. Касаткин В.В., Ахунов В.Д., Мамонов Б.П., Ильичев В.А. Динамика загрязнения объекта подземного ядерного взрыва Тайга и защитные мероприятия по радиационной безопасности. Сборник докладов и тезисов междунар. конф. «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий». Т. 2. Радиоактивное загрязнение окружающей среды после ядерных взрывов и аварий. Мониторинг, базы данных, поля загрязнения и их динамика. Под ред. Израэля Ю.А. СПб: Гидрометеиздат, 2006. С. 223-225.
6. Васильев, А.П., Дубасов В.А., Ильичев В.В. и др. Ядерные взрывные технологии: эксперименты и промышленные применения. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017. 508 с.
7. Приходько Н.К., Ильичев В.А., Касаткин В.В. Закономерности миграции радионуклидов в массивах горных пород // Горный журнал. 2003. № 4-5. С. 112-114.
8. Артамонова С.Ю. Геотехногенные системы подземных ядерных взрывов на территории Якутии (1974-1987 гг.): геоэкологические модели и особенности переноса радионуклидов и сопутствующих элементов. Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Томск, 2015. 339 с.
9. 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.
10. Бондарева Л.Г., Чеботина М.Я., Артамонова И.Г., Тананаев И.Г. Тритий. Теория, практика, последствия: монография. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 2024. 359 с.
11. Мурзадилов Т.Д. Принципы ртутотметрической томографии границ областей наведённой трещиноватости от подземных ядерных взрывов // Вестник НЯЦ РК. 2020. № 3. С. 113-121.
12. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии. Учебное пособие. Томск: STT, 2009. 430 с.
13. experiments and industrial applications. Snezhinsk: RFNCVNIITF; 2017. 508 p. (In Russian).
14. Prikhodko NK, Ilyichev VA, Kasatkin VV. Patterns of migration of radionuclides in rock massifs. *Gornyi zhurnal = Mining journal*. 2003;4-5; 112— 114. (In Russian).
15. Artamonova SYu. Geotechnogenic systems of underground nuclear explosions on the territory of Yakutia (1974-1987): geocological models and features of the transfer of radionuclides and related elements. Dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Tomsk; 2015. 339 p. (In Russian).
16. Repin VS, Ramzaev VP, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Zelenitsova SV, Sednev K.A, 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-134-147. (In Russian).
17. Bondareva LG, Chebotina MYa, Artamonova IG, Tananaev IG. Tritium. Theory, practice, consequences. Monograph. Apatity: Publishing house of the Kola Scientific Center; 2024. 359 p. (In Russian).
18. Murzadilov TD. Principles of mercury-metric tomography of the borders of underground nuclear explosions induced fracture regions. *Vestnik NYaTs RK = NNC RK Bulletin*. 2020;(3): 113-121. (In Russian).
19. Rikhvanov LP. Radioactive elements in the environment and problems of radioecology. Textbook. Tomsk: STT; 2009. P. 430. (In Russian).
20. Apenko AV, Romanov AM, Tokaev DN, Frolov Z.N. Distribution of gaseous tritium at underground nuclear explosion sites of semipalatinsk test site. *Vestnik NYaTs RK = NNC RK Bulletin*. 2019;(2): 75-80. DOI: 10.52676/1729-7885-2019-2-75-80. (In Russian).
21. Kasatkin VV, Kasatkin AV, Ilyichev VA, Sedov NS, Samorodova TS. Stages for reclassifying Globus-1 peaceful nuclear explosion object as a site for preserving special radwastes. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2014;116(3): 157–161. (In Russian) DOI: 10.1007/s10512-014-9841-0.
22. Golubov BN, Sapozhnikov YuA. “Globus-1” Underground Nuclear Explosion and Its Radionuclides Long-Range Migration to the Underground Drinking Water Sources in Kineshma District of Ivanovo Region. *Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manah Prostranstvo i Vremya = Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time*. 2016;13(1): 22. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28796042> (Accessed: 31.03.2024). (In Russian).
23. Logachev VA, ed. Modern Radioecological Situation in Areas of Peaceful Nuclear Explosions on the Territory of the Russian Federation. Moscow: IzdAT Publisher; 2005. 256 p. (In Russian).
24. Ramzaev VP, Biblin AM, Repin VS, Khramtsov EV, Varfolomeeva KV. Tritium contamination of surface and ground waters at the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(1): 6-26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26. (In Russian).
25. Golubev B. Migration of radionuclides from the cavities of the underground thermonuclear release “Kristall” into a diamond mining quarry “Successful”. In: Sapozhnikov Yu, Goralchuk A. Collection of reports and abstracts of the Republican Scientific and Practical Institute of Conference “Radiation safety of the Republic of Sakha (Yakutia)”. Yakutsk; 2004. P. 182-192. URL: <https://disk.yandex.ru/i/FHfq-PGFgybsXA> (Accessed: 14.06.2023). (In Russian).
26. Artamonova SYu, Bondareva LG, Melgunov MS, Simonova GV. Modern radioecological situation at the technological site of the peaceful underground nuclear explosion “Kristall” and radionuclides in the surface waters of the adjacent territory (Western Yakutia). *Radiochimiya = Radiochemistry*. 2023;65(5): 482-500. DOI: 10.31857/S0033831123050118. (In Russian).

13. Апенько А.В., Романов А.М., Токаев Д.Н., Фролов З.Н. Распределения газового трития на участках подземных ядерных взрывов семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. 2019. № 2. С. 75-80. DOI: 10.52676/1729-7885-2019-2-75-80.
14. Касаткин В.В., Касаткин А.В., Ильичев В.А. и др. Этапы перевода объекта использования ядерного заряда в мирных целях «Глобус-1» в пункт консервации особых радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2014. Т. 116, № 3. С. 157-161. ISSN 0004-7163. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1030/1011 (Дата обращения: 14.06.2024).
15. Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А. Подземный ядерный взрыв "Глобус-1" и дальняя миграция его радионуклидов к подземным источникам питьевого водоснабжения Кинешемского района Ивановской области // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2016. Т. 13, № 1. С. 14. URL: 2227-9490e-aprovgr_e-ast13-1.2016.91 (Дата обращения: 14.06.2024).
16. Современная радиозоологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации / Колл. авторов; под рук. проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2005. 256 с. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/sovremennaya-radiоекoлогическая-obstanovka-rf_2005/go,0/ (Дата обращения: 14.06.2024).
17. 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.
18. Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А., Горальчук А.В. Миграция радионуклидов из полости подземного термоядерного взрыва «Кристалл» в алмазодобывающий карьер «Удачный». Сб. докладов и тезисов Республиканской науч.-практ. конф. «Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия)», Якутск, 2004. С. 182-192. URL: <https://disk.yandex.ru/i/FHfq-PGFGybsXA> (Дата обращения: 14.06.2024).
19. Артамонова С.Ю., Бондарева Л.Г., Мельгунов М.С., Симонова Г.В. Современная радиозоологическая обстановка на технологической площадке мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» и радионуклиды в поверхностных водах прилегающей территории (западная Якутия) // Радиохимия. 2023. Т. 65, № 5. С. 482-500. DOI: 10.31857/S0033831123050118.
20. Ramzaev V, Mishin A, Golikov V, et al. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review // Journal of environmental radioactivity. 2009. Vol. 100, № 12. P. 1092-1099. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.04.002. Epub 2009 May 17. PMID: 19446936.
21. 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.
22. 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.
23. Ramzaev V., Repin V., Medvedev A. et al. Radiological investigations at the "Taiga" nuclear explosion site: Site description and in situ measurements // Journal of environmental radioactivity. 2011. Vol. 102. P. 672-680. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.04.003.
24. 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.
25. Ramzaev V, Mishin A, Golikov V, Argunova T, Ushnitski V, Zhuravskaya A, et al. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review. *Journal of environmental radioactivity*. 2009;100(12): 1092-1099. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.04.002. Epub 2009 May 17. PMID: 19446936.
26. Khrantsov 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-58-68. (In Russian).
27. Khrantsov EV, Repin VS, Bibliin 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123. (In Russian).
28. Ramzaev V, Repin V, Medvedev A, Khrantsov E, Timofeeva M, Yakovlev V. Radiological investigations at the "Taiga" nuclear explosion site: Site description and in situ measurements. *Journal of environmental radioactivity*. 2011;102: 672-680.
29. Bibliin AM, Khrantsov 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;5(4): 149-161. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-149-161.
30. Bibliin 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.
31. Titov AV, Shandala NK, Isaev DV, Belskikh IS, Semenova MP, Doronova TA, et al. Radiation Survey in the Area of Peaceful Nuclear Explosion «Takhta-Kugulta». *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(2): 13-22. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-13-22. (In Russian).
32. Kasatkin AV, Ilyichev VA, Kasatkin VV, Larina AI. Ensuring radiation safety at objects of peaceful nuclear explosions. *Gornyi zhurnal = Mining journal*. 2021;3: 80-85. (In Russian).
33. Titov AV, Shandala NK, Belskikh IS, Isaev DV, Gushchina JV, Doronova TA, et al. The Radiation Situation in the Area of the Meteorit-5 Peaceful Nuclear Explosion. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*. 2021;16: 94-102. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-94-102. (In Russian).
34. Ramzaev VP, Travnikova IG, Basalaeva LN, Bruk GYa, Golikov VYu, Mishin AS, et al. On influence of the underground nuclear explosions Crystal and Kraton-3 on radiological situation in the nearest settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(2): 14-19. (In Russian).
35. Ershov VV. Possible effects on the ecological and hydrological situation of the territories of underground nuclear explosions. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2023;3: 37-42. DOI: 10.53085/0034-026X_2023_04_37. (In Russian).
36. Aktayev M, Subbotin S, Aidarkhanov A, Aidarkhanova A, Timonova L, Larionova N. Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritium-contaminated groundwater at the Semipalatinsk test site. *PLoS ONE*. 2024;19(3): e0300971. DOI: 10.1371/journal.pone.0300971.
37. Aktaev MR, Aidarkhanov AO, Aidarkhanova AK, Pronin SS, Iskenov AO. Monitoring of tritium pollution of the waters of the Shagan River. *Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazakhstan = Bulletin of the National Research Center of the Republic of Kazakhstan*. 2021;2: 25-29. DOI: 10.52676/1729-7885-2021-2-25-29. (In Russian).

25. 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.
26. 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.
27. Касаткин А.В., Ильичев В.А., Касаткин В.В., Ларина А.И. Обеспечение радиационной безопасности на объектах мирных ядерных взрывов // Горный журнал. 2021. № 3. С. 80-85.
28. Титов А.В., Шандала Н.К., Бельских Ю.С. и др. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Метеорит – 5» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 94-102.
29. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. О влиянии подземных ядерных взрывов «Кратон-3 и «Кристалл» на радиационно-гигиеническую обстановку в близлежащих населенных пунктах // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 2. С. 14-19.
30. Ершов В.В. Возможные влияния подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в мирных целях на эколого-гидрогеологическую обстановку // Разведка и охрана недр. 2023. № 3. С. 37-42.
31. Aktayev M., Subbotin S., Aidarkhanov A. et al. Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritiumcontaminated groundwater at the Semipalatinsk test site // PLoS ONE. 2024. Vol. 19, №.3. e0300971. DOI: 10.1371/journal.pone.0300971.
32. Актаев М.Р., Айдарханов А.О., Айдарханова А.К. и др. Мониторинг тритиевого загрязнения вод р. Шаган // Вестник НЯЦ РК. 2021. № 2. С. 25-29. DOI: 10.52676/1729-7885-2021-2-25-29.
33. Dasher D., Hanson W., Read S. et al. An assessment of the reported leakage of anthropogenic radionuclides from the underground nuclear test sites at Amchitka Island, Alaska, USA to the surface environment. 2002. Vol. 60. №. 1. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00102-3.
34. Радиационная обстановка по территории России и сопредельных государств в 2022 г. Ежегодник. НПО «Тайфун». Обнинск, 2023. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2022.pdf (Дата обращения: 08.07.2024 г).

Received: July 18, 2024

Поступила: 18.07.2024

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

Варфоломеева Ксения Владимировна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

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

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

Архангельская Генриэтта Владимировна – доктор медицинских наук, главный 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

Для цитирования: Репин В.С., Варфоломеева К.В., Библин А.М., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Архангельская Г.В. 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

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

Kseniya V. Varfolomeeva – 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 the Information and Analytical Center, Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Svetlana A. Zelentsova – Junior Researcher, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Konstantin A. Sednev – 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, Saint Petersburg, Russia

Genrietta V. Arkhangel'skaya – Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

For citation: Repin V.S., Varfolomeeva K.V., Biblin A.M., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Arkhangel'skaya G.V. Tritium content in water bodies in regions of peaceful nuclear explosions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 67–78. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-67-78

Activity concentrations of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{241}Am in sieved soil and soil inclusions from the «Taiga» peaceful nuclear explosions site

Valery P. Ramzaev, Viktor S. Repin

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

The article presents results of comparative study of ^{137}Cs , ^{60}Co , and ^{241}Am activity concentrations in components of the soil samples collected in 2009 on the territory adjacent to the «Taiga» peaceful nuclear explosions site (the Perm region, Russia). The objective of the study was to identify differences between: 1) non fractionated native soil, 2) the soil passed through a sieve with a mesh size of 1.2 mm, and 3) the screened out coarse components. Measurements of the radionuclides activities in counting samples were performed using a semiconductor gamma spectrometer. Statistically significantly lower activity concentrations of ^{137}Cs (factor of 1.2), ^{60}Co (factor of 2.2) and ^{241}Am (factor of 2.6) were found in the finely dispersed sieved fraction of soil compared to the native soil. On the opposite, in the solid radioactive inclusions selected from the screened out coarse fraction, the activity concentrations of ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{241}Am were significantly higher compared to those in the native soil. Especially large differences (up to a factor of 10 and more) between the native soil and radioactive inclusions were observed for the refractory and low-volatile ^{60}Co and ^{241}Am . Presumably, these radionuclides were concentrated predominantly in the glassy substance of the radioactive inclusions. For ^{137}Cs , the unevenness in the contamination of different soil components was less pronounced. The results obtained will be used to standardize methods for assessing radioactive contamination of the territory at the sites of peaceful nuclear explosions

Key words: peaceful nuclear explosion, soil, fractionation, sieving, ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , activity concentration.

Удельная активность ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am в просеянной почве и почвенных включениях с места проведения мирных ядерных взрывов «Тайга»

В.П. Рамзаев, В.С. Репин

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

В статье представлены результаты сравнительного анализа содержания ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{241}Am в компонентах проб почвы, отобранной в 2009 году на территории, прилегающей к месту проведения экскавационных мирных ядерных взрывов «Тайга» (Пермский край, Россия). Целью исследования было выявить различия между нативной почвой, просеянной мелкодисперсной фракцией почвы и отсеянными почвенными компонентами по показателю удельной активности радионуклидов. Для фракционирования почвы использовали сито с размером ячеек 1,2 мм. Измерения активности радионуклидов в счетных образцах выполняли с помощью полупроводникового гамма-спектрометра. По сравнению с исходной нативной почвой, просеянная фракция почвы характеризуется статистически значимо меньшими величинами удельной активности ^{137}Cs (в 1,2 раза), ^{60}Co (в 2,2 раза) и ^{241}Am (в 2,6 раза). В твердых радиоактивных включениях, которые содержались в отсеянной крупнодисперсной фракции, значения удельной активности ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{241}Am были существенно выше таковых в нативной почве. Эти различия достигали десятикратных и более значений для тугоплавких и труднолетучих ^{60}Co и ^{241}Am . Предположительно, эти радионуклиды концентрировались преимущественно в стеклообразном веществе радиоактивных включений. Для ^{137}Cs эта неравномерность загрязнения разных компонентов почвы была менее выраженной. Полученные результаты будут использованы для стандартизации методов оценки радиоактивного загрязнения территории в местах проведения мирных ядерных взрывов.

Ключевые слова: мирный ядерный взрыв, почва, фракционирование, просеивание, ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , удельная активность.

Valery P. Ramzaev

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

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

Рамзаев Валерий Павлович

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

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

Introduction

Monitoring of radiation environment (radiation monitoring) in the areas of the nuclear explosions for peaceful purposes (1965–1988) (peaceful nuclear explosions, PNE) is regulated in the Russian Federation by the sanitary rules SanPiN 2.6.1.2819-10¹. In accordance with this document, when assessing the radiation environment at the site of a PNE, it is necessary to determine the average and maximum values of surface soil contamination by technogenic radionuclides in the protected zone. Unfortunately, the SanPiN 2.6.1.2819-10 does not specify methods for the soil sampling and preparation of the samples for radiometric measurements. Special officially adopted methodological recommendations on this issue also do not exist in relation to the venues of PNEs. At the same time, such methods may vary in practice, judging by the publications of different researchers who measured the content of technogenic radionuclides in soil at the sites of PNEs [1–8]. It applies to the spatial distribution of sampling plots, the number of samples, the depth and technology of sampling, and the specifics of sample preparation for measurements in the laboratory. The lack of a generally accepted approach to radiation monitoring of soil at the sites of PNEs makes it difficult to systematize and compare results of the measurements and to make a forecast based on dynamics of the radiation environment.

Preparation of a counting aliquot (sample) is one of the stages of the soil sample treatment, the implementation of which can affect the final assessment of the level of radioactive contamination of the soil. In the simplest version, a native sample is used after mixing as thoroughly as possible [4, 5]. In this case, it is specifically noted that stones, plant roots and foreign inclusions were left in the counting sample for analysis. A certain disadvantage of this method is uneven distribution of different structural components of the soil within the counting sample and, accordingly, an increase in uncertainty of the assessment of the actual activity of a radionuclide. For this reason, some authors use for radiometric measurements a fraction of the dry soil passed through a sieve with a mesh size of 1 mm [1, 2, 8].

In general, passing soil through a sieve (the mesh diameter is from 1 to 3 mm) in order to obtain a counting sample is a very common stage of the sample preparation for the measurements of technogenic radionuclides in the soil in cases of nuclear explosions and accidents [8–15]. The conclusion about levels of the soil contamination by technogenic radionuclides is often based on the results of analysis of the sieved fraction. Indeed, the sieved sample is comparatively homogeneous in the content of these radionuclides (in general, environmental pollutants) in the soil particles smaller than the size of the selected mesh. However, the screened-out or previously separated larger components may also contain some of the pollutant, so it is recommended to analyze them (or part of them) in parallel with the sieved soil fraction to assess the contribution of these components to the total pollutant inventory [16]. To the best of our knowledge, such a recommendation has not previously been considered when conducting research in the areas adjacent to the PNE sites.

During a revision of the archive of soil samples taken at the «Taiga» PNE site (the Perm region, Russia), we found large

Введение

Контроль показателей радиационной обстановки (радиационный контроль) в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях (мирных ядерных взрывов, МЯВ) регулируется в Российской Федерации санитарными правилами СанПиН 2.6.1.2819-10¹. В соответствии с этим документом, при оценке радиационной обстановки в месте проведения МЯВ требуется определить средние и максимальные значения поверхностного загрязнения почвы техногенными радионуклидами на территории охранной зоны. При этом в СанПиН 2.6.1.2819-10 не оговариваются методы отбора проб почвы и подготовки проб к радиометрическим измерениям. Специальных официально принятых методических рекомендаций по этому вопросу применительно к районам проведения МЯВ также не существует. Между тем, судя по публикациям разных исследователей, проводивших определение содержания техногенных радионуклидов в почве в местах проведения МЯВ, такие методы могут существенно различаться [1–8]. Это касается как пространственного распределения мест отбора и количества проб, глубины и технологии пробоотбора, так и особенностей подготовки проб к измерениям в лаборатории. Отсутствие общепринятого подхода к радиационному контролю в отношении почвы в местах проведения МЯВ делает затруднительным систематизацию и сравнительную оценку полученных результатов измерений, а также составление прогноза по динамике радиационной обстановки.

Одним из этапов пробоподготовки, выполнение которого может повлиять на конечную оценку уровня радиоактивного загрязнения почвы, является изготовление счетного образца. В наиболее простом варианте используется нативная (полученная при отборе) проба после по возможности тщательного перемешивания [4, 5]. При этом специально отмечается, что камни, корни растений и посторонние включения были оставлены в счетном образце для анализа. Определенным недостатком этого метода является неравномерное распределение разных структурных компонентов почвы внутри счетного образца и, соответственно, увеличение неопределенности оценки искомой активности радионуклидов. Поэтому, некоторые авторы для анализа образцов, которые были отобраны на местах проведения МЯВ, использовали для радиометрических измерений фракцию сухой почвы, просеянной через сито с размером ячеек 1 мм [1, 2, 8].

В целом, просеивание высушенной почвы через сито (диаметр ячеек от 1 до 3 мм) с целью получения счетного образца является весьма распространенным этапом пробоподготовки при исследованиях техногенных радионуклидов в почве в случаях ядерных взрывов и аварий [8–15]. Часто, именно по результатам анализа этой просеянной фракции делается заключение об уровнях загрязнения почвы техногенными радионуклидами. Просеянный образец является сравнительно гомогенным в отношении содержания этих радионуклидов (в общем виде – загрязнителей окружающей среды) в частицах почвы, имеющих размеры меньше, чем размер выбранной ячейки. Однако отсеянные или ранее отделенные более крупные компоненты также

¹ SanPiN 2.6.1.2819-10 "Ensuring radiation safety of the population living in the areas of the event (1965 - 1988) nuclear explosions for peaceful purposes" (In Russ.). [СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965 - 1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях».]

glassy (vitreous) inclusions in some samples [17]. Activity concentrations (ACs) of the anthropogenic radionuclides ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu and ^{241}Am were higher in the inclusions than in the native soil. The greatest contribution to the total radioactivity, both in native soil and in inclusions, was made by radiologically important radionuclides ^{60}Co ($T_{1/2} = 5.27$ year), ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17$ year) and ^{241}Am ($T_{1/2} = 432$ year). Based on the results of the study [17], the question arose as to how correct the assessment of radioactive contamination obtained by using only the sieved fraction of soil from the territory adjacent to the site of this PNE could be.

The aim of the study was to compare native soil, sieved soil, and screened out coarse inclusions in terms of ACs of ^{60}Co , ^{137}Cs , and ^{241}Am .

Materials and methods

The sampling site (61.30° N, 56.60° E) is located in the north of the Perm region. Three thermonuclear charges (the explosive force is 15 kt of TNT equivalent, each) of the «Taiga» series were detonated in 1971 in this place in order to test nuclear explosive technologies for the construction of a canal between the Kama and Pechora rivers [18]. As a result of these PNEs, carried out with the planned ejection of soil, a crater was formed. The crater has been naturally filled with water. Now, it is an artificial lake of 10–15 m deep, 700 m long and 350 m wide (see Fig. 1 in [17]).

In 2009, an expedition team, including researchers from the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev (RIRH), collected soil samples at six locations at the «Taiga» PNE site. Counting samples were made from the native (unfractionated) soil. Results of measurements of the activity of gamma-emitting technogenic radionuclides in these samples are provided in [5]. The samples were dried and sent for storage to the sample archive of the RIRH. For the purpose of this study, we selected 10 samples of native soil from the archive. These had been taken in layers on a mound of soil in the most contaminated southeastern part of the lake shore (the plot No. 2 in [5, 17]).

The archival samples were weighed prior to further processing. It was considered that glassy inclusions with a total mass of 8.4 g had already been extracted from some samples [17]. A sieve with mesh sizes of 1.2 mm was used to fractionate the soil. Aliquots of the obtained finely dispersed fraction (the sieved soil or fine soil) were weighed, placed in metal containers with a volume of 250 cm³ or 40 cm³ and sent for gamma spectrometric measurements. Radionuclides activities were measured using a germanium semiconductor detector and a multi-channel analyzer in accordance with the procedure described in [5, 17]. The duration of the measurement was sufficient to ensure that the statistical uncertainty of estimating the net count rate in the photopeak of 59.5 keV (^{241}Am) did not exceed 7% (1 sigma). The corresponding uncertainties for the full-energy peaks of 661.6 keV (from $^{137\text{m}}\text{Ba}$, which is the decay daughter product of ^{137}Cs), 1173.2 keV (from ^{60}Co), and 1332.5 keV (from ^{60}Co) were less than 2%.

The screened out coarse fraction included pebbles, plant roots, coarse sand particles, as well as solid inclusions, some of which resembled pieces of melted glass described and named as «taiganite» in the paper [17]. 49 large (size within the range of 0.4–3 cm) solid inclusions were sampled out of this fraction. Each of the selected samples underwent a screening procedure for the presence of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{241}Am . A NaI(Tl) detector (the crystal sizes = 100 mm (diameter) by 100 mm (height)), sur-

могут содержать некоторое количество искомого загрязнителя, поэтому их (или часть из них) рекомендуется проанализировать параллельно с фракцией просеянной почвы для оценки вклада данных компонентов в общий запас загрязнителя [16]. Насколько нам известно, эта рекомендация ранее не принималась в расчет при проведении исследований на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ.

Во время ревизии архива проб почвы, отобранной в месте проведения МЯВ «Тайга» (Пермский край, Россия), мы обнаружили присутствие крупных стекловидных включений в некоторых пробах [17]. Удельная активность (УА) техногенных радионуклидов ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{241}Am во включениях была больше, чем таковая в нативной почве. Наиболее существенный вклад в общую активность этих радионуклидов как в нативной почве, так и во включениях вносили радиологически значимые радионуклиды ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,27$ года), ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17$ года) и ^{241}Am ($T_{1/2} = 432$ года). На основании результатов, полученных в ходе исследования [17], возник вопрос о том, насколько корректной может быть оценка радиоактивного загрязнения, полученная при использовании только просеянной фракции почвы с территории, которая прилегает к месту этого МЯВ.

Цель исследования – сравнение нативной почвы, просеянной почвы и отсеянных почвенных компонентов по показателю УА ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am .

Материалы и методы

Место отбора проб (61,30° с.ш., 56,60° в.д.) расположено на севере Пермского края. Три термоядерных взрыва серии «Тайга» были произведены в 1971 г. в этом месте с целью опробования ядерных взрывных технологий для прокладки канала между реками Кама и Печора [18]. В результате этих МЯВ, выполненных с запланированным выбросом грунта, был сформирован кратер. В последующем кратер естественным образом заполнился водой, и в настоящее время он представляет собой искусственное озеро глубиной 10–15 м, длиной примерно 700 м и шириной 350 м (см. рис. 1 в [17]).

В 2009 г. комплексной экспедицией, в которой принимали участие сотрудники ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, на объекте «Тайга» в шести точках были отобраны пробы почвы. Счетные образцы были изготовлены из нативной (нефракционированной) почвы. Результаты измерений активности гамма-излучающих техногенных радионуклидов в этих образцах приведены в [5]. Сами образцы были высушены и направлены на хранение в архив проб ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Для проведения настоящего исследования из архива нами были взяты 10 образцов нативной почвы, послыно отобранной на навале грунта в наиболее загрязненной юго-восточной части берега озера (участок № 2 по [5, 17]).

Перед обработкой архивные образцы были взвешены. При этом было учтено, что ранее из некоторых образцов уже были извлечены стекловидные включения общей массой 8,4 г [17]. Для фракционирования почвы использовали сито с размерами ячеек 1,2 мм. Образцы полученной мелкодисперсной фракции (просеянной почвы или мелкозема) были взвешены, помещены в металлические контейнеры объемом 250 см³ или 40 см³ и направлены на гамма-спектрометрические измерения. Активность радионуклидов измеряли с помощью германиевого полупроводнико-

rounded by a lead shield, and a 1024-channel analyzer (ATOMTEX, Belarus) were used for this purpose. The energy resolution (full width at half maximum) of the gamma-ray spectrometer was 8.9% for the 661.6 keV peak of ^{137}Cs – $^{137\text{m}}\text{Ba}$. A sample was placed at a distance of 3 mm from the upper surface of the detector. The spectrum was measured for 3600 s. A sample has been categorized as «hot» inclusion if the characteristic photo peaks of ^{241}Am (59.5 keV), ^{137}Cs (661.6 keV), and ^{60}Co (1173.2 keV and 1332.5 keV) were formed. A sample has been classified as «cold» inclusion if the formation of the characteristic peaks was not observed, or only the peak at 661.6 keV was formed.

A total of 34 «hot» inclusions were found among the 49 screened inclusions. Five «hot» inclusions could be attributed to glassy type («taiganite»), judging by the description and photos given in the paper [17]. Among the other items, which we called coated «hot» inclusions, there were formations that looked like shapeless lumps of melted sand (Fig. 1), but in general, the formations somewhat resembling lumps (agglomerates) of dried soil prevailed (Figs. 2A, 3A, 4A). However, unlike lumps of soil or clay, they did not crumble even when pressed hard with tweezers. The 29 coated «hot» inclusions were combined into one counting sample (mass = 13.53 g), in which activities of the radionuclides were measured using a semiconductor gamma spectrometer (ORTEC, USA). Characteristics of the spectrometer and features of the calibration of the detector are provided in the papers [5, 17].

Three coated «hot» inclusions and one pebble were sonicated in an aqueous environment in accordance with the method described in [17]. Although some of the small soil particles separated from the inclusions surface, the samples retained their shape after the treatment (Fig. 2B). The pebble showed similar resistance to ultrasound in the aquatic environment (Fig. 2D).

To determine the degree of acid leaching of radionuclides, one of the large coated «hot» inclusions (mass = 1.2 g), taken from the depth of 4–6 cm, was crushed in a mortar to a particle size of 1 mm or less. The ground sample was mixed with 6N HCl in a ratio of 1:10 (by weight) and placed in a boiling water bath for 1.5 hours. After rinsing in distilled water, the mixture was passed through the filter paper. The solid phase (particles), which was retained on the filter, together with the filter itself was ashed at a temperature of 400 °C.

The similar procedure was applied to an aliquot (mass = 10 g) of the sieved sample of the soil that had also been taken from the depth of 4–6 cm. The activity of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{241}Am in each sample was measured before and after the sonication or acid treatment. The measurement method is described in [17]. The structure of the spongy vitreous material was visible inside the coated «hot» inclusions after grinding to the middle with an abrasive tool (Fig. 3B). The presence of the vitreous material in the «hot» inclusions may be associated with the ejection of such material from the blast zone to the ground surface [17]. The non-uniform density of the substance and vesicular structures inside the «hot» inclusions were also discernible when such samples were X-rayed (Fig. 4B). The «cold» inclusions, which were pebbles covered with a thin layer of adhering soil, had a uniform density of the substance inside (Figs. 4C, D).

вого детектора (ППД) и многоканального анализатора в соответствии с методикой, описанной в [5]. Продолжительность измерения была достаточна для того, чтобы неопределенность оценки площади пика полного поглощения с энергией 59,5 кэВ (^{241}Am) не превышала 7% (1 сигма). При этом соответствующая неопределенность для пиков 661,6 кэВ ($^{137\text{m}}\text{Ba}$ – дочерний продукт распада ^{137}Cs), 1173,2 кэВ (^{60}Co) и 1332,5 кэВ (^{60}Co) была менее 2%.

В состав отсеянной крупнодисперсной фракции входили камешки, корни растений, частицы крупного песка, а также твердые включения, некоторые из которых напоминали кусочки оплавленного стекла, описанные и поименованные как «тайганиты» в работе [17]. Из отсеянной фракции были отобраны 49 крупных (размеры в пределах 0,4–3 см) твердых включений. Каждый из отобранных объектов прошел процедуру скрининговых измерений на присутствие ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am . Для этого использовали NaI(Tl) детектор (размеры кристалла 100 мм (диаметр) на 100 мм (высота)), размещенный в свинцовой защите, и 1024-канальный анализатор (фирма АТОМТЕХ, Республика Беларусь). Энергетическое разрешение (полная ширина на половине максимума) гамма-спектрометра составила 8,9% для 661,6 кэВ пика of ^{137}Cs – $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Образец размещали на расстоянии 3 мм от верхней поверхности детектора. Измерение спектра проводили в течение 3600 с. Если за это время происходило формирование характерных пиков с энергиями 59,5 кэВ (^{241}Am), 661,6 кэВ (^{137}Cs), 1173,2 кэВ (^{60}Co) и 1332,5 кэВ (^{60}Co), то такой образец относили к категории «горячих» включений. Если формирование характерных пиков не отмечалось, или формировался только пик с энергией 661,6 кэВ, то образец относили к категории «холодных» включений.

В общей сложности среди 49 включений были найдено 34 «горячих» образца, из которых 5 можно было отнести к стекловидным включениям («тайганиты»), судя по описанию и фотографиям, приведенным в работе [17]. Среди остальных объектов, которые мы назвали покрытые «горячие» включения, имелись образования, похожие на бесформенные комочки оплавленного песка (рис. 1), но в целом преобладали формации, несколько напоминавшие комочки (агломераты) засохшей почвы (рис. 2A, 3A, 4A). Однако, в отличие от комочков почвы или глины, даже при сильном надавливании пинцетом они не крошились.

Прошедшие скрининг 29 покрытых «горячих» включений были объединены в один счетный образец массой 13,53 г, в котором с помощью полупроводникового гамма-спектрометра фирмы ORTEC (США) была измерена активность искомых радионуклидов. Характеристики спектрометра и особенности градуировки детектора приведены в работах [5, 17].

Три покрытых «горячих» включения и один камешек прошли обработку ультразвуком в водной среде в соответствии с методом [17]. Покрытые включения сохраняли свою форму (рис. 2B), хотя некоторая масса мелких почвенных частиц отделялась от их поверхности и опала на дно виалы. Аналогичную устойчивость к ультразвуку в водной среде демонстрировал камешек (рис. 2D).

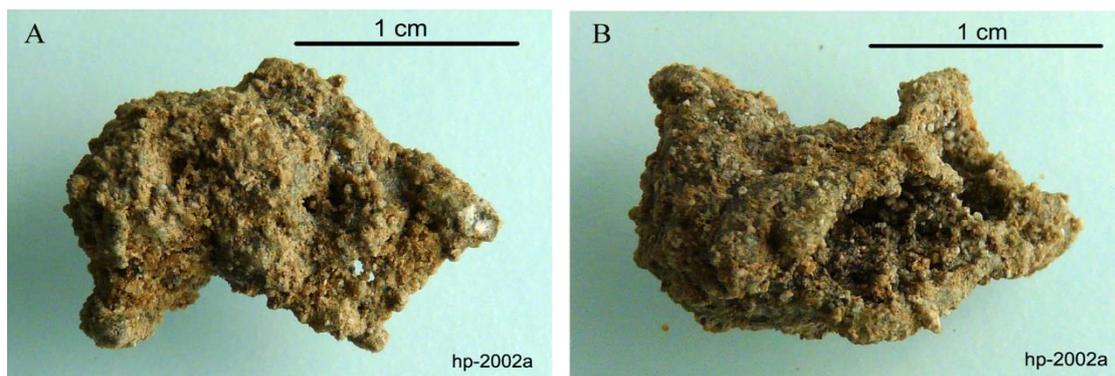


Fig. 1. Outward appearance of the coated "hot" inclusion hp-2002a (fused sand) in two projections:

A – «top» view, B – «bottom» view

[Рис. 1. Внешний вид покрытого «горячего» включения hp-2002a (оплавленный песок) в двух проекциях:

A – вид «сверху», B – вид «снизу»]

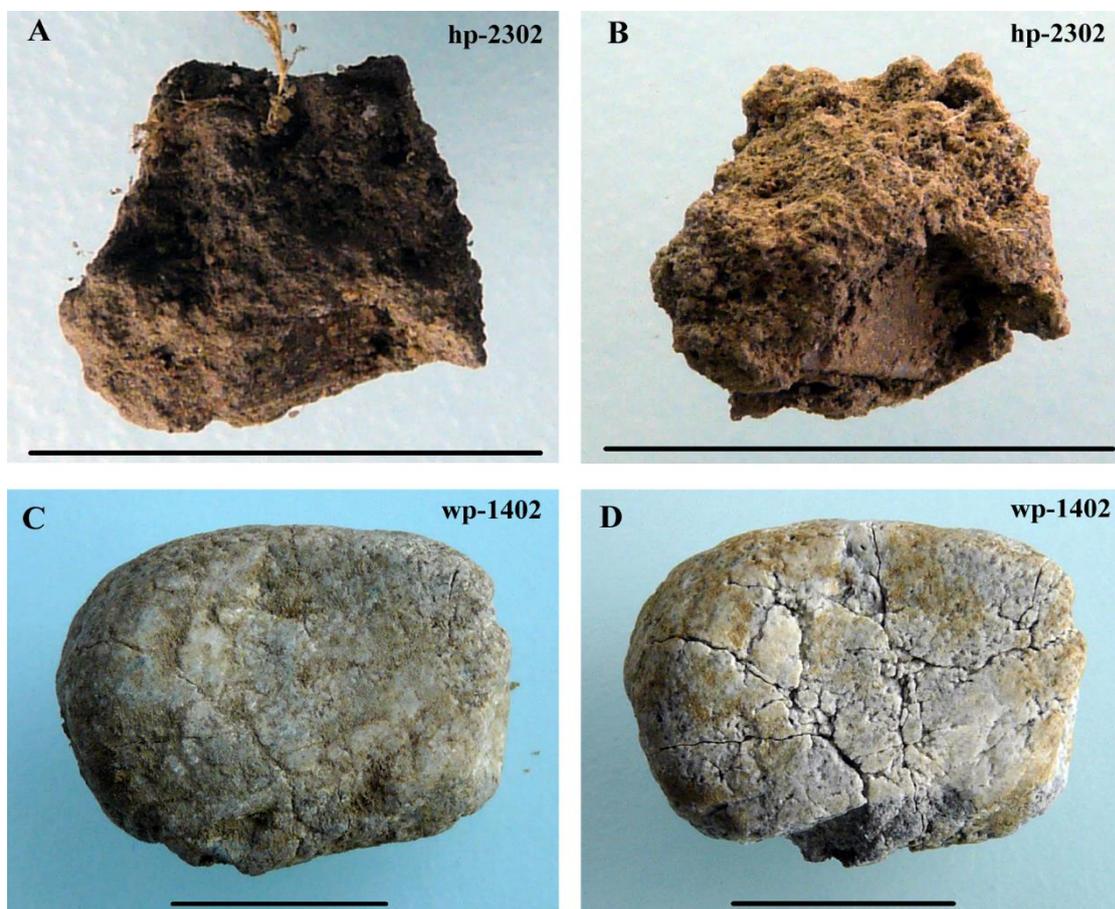


Fig. 2. Coated «hot» inclusion (hp-2302) and pebble (wp-1402) before (A, C) and after (B, D) ultrasonic treatment in aqueous environment. Ultrasound exposure was performed for 600 s using the Citizen ultrasonic cleaner SW 1500 (CBM Corporation, Japan) at a frequency of 40 kHz and a power of 40 W. The measuring segment is 1 cm

[Рис. 2. Покрытое «горячее» включение (hp-2302) и камешек (wp-1402) до (A, C) и после (B, D) ультразвуковой обработки в водной среде. Воздействие ультразвуком проводили в течение 600 с, используя Citizen ultrasonic cleaner SW 1500 (CBM Corporation, Япония) при частоте 40 кГц и мощности 40 Вт. Мерный отрезок равен 1 см]

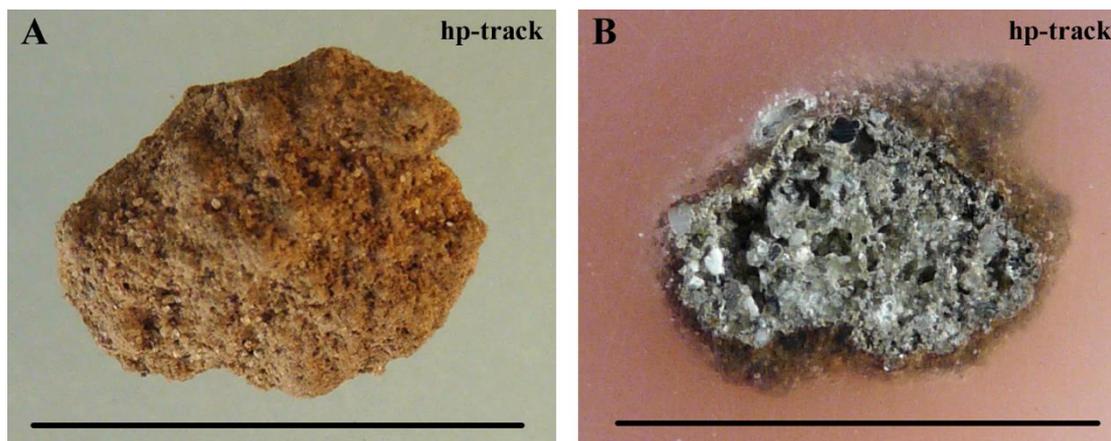


Fig. 3. Outward appearance of the coated «hot» inclusion hp-track (A) and its internal structure shown after grinding down to approximately the middle (B). The inclusion was cast into acrylic plastic and ground down using an abrasive tool. The measuring segment is 1 cm

[Рис. 3. Внешний вид покрытого «горячего» включения hp-track (A) и его внутренняя структура, показанная после стачивания примерно до середины (B). Включение было залито в акриловую пластмассу и сточено с помощью абразивного инструмента. Мерный отрезок равен 1 см]

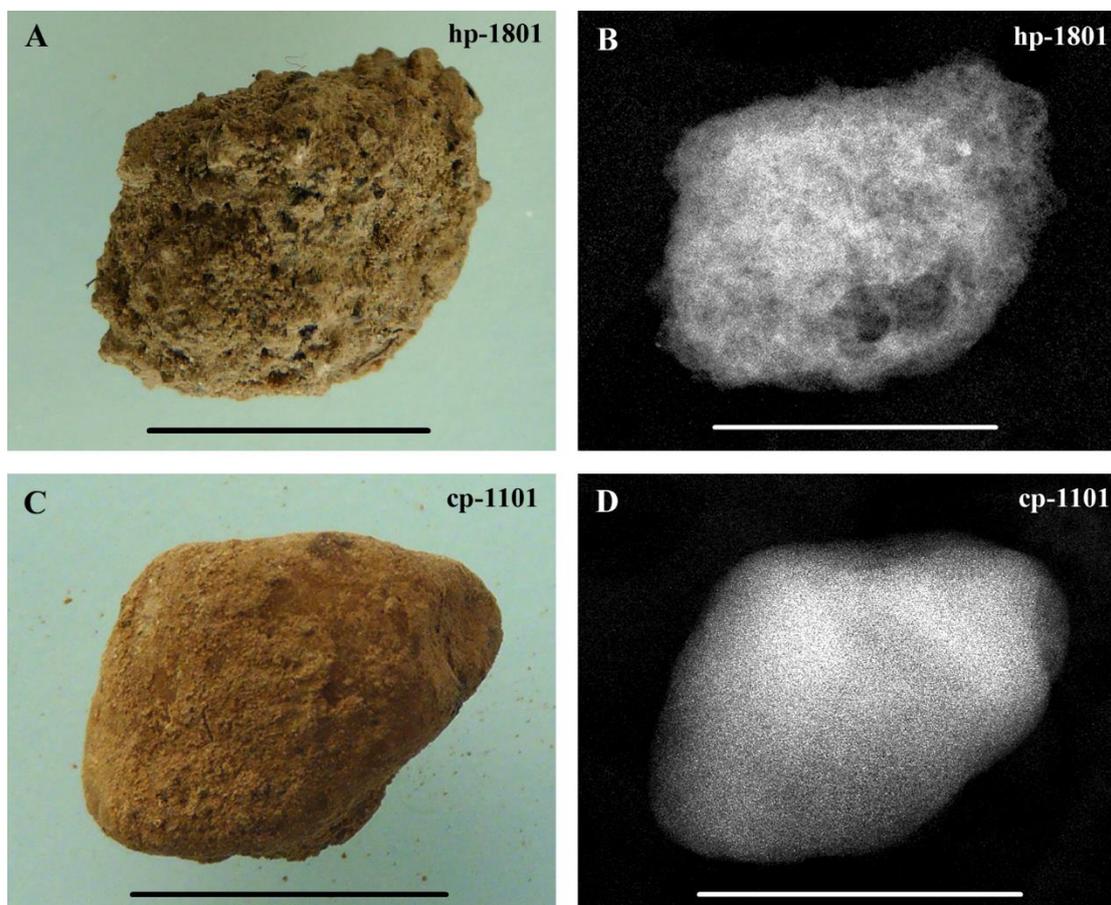


Fig. 4. Outward appearance of the coated “hot” inclusion hp-1801 (A) and “cold” stone cp-1101 (C) and their X-ray images (B) and (D). The X-ray images were made using the Evolution X 3000-2C apparatus (New Life Radiology SRL, Italy) at a tube current of 8 mA, a tube voltage of 70 kV and a tube focus-film distance of 25 cm. The measured segment is 1 cm

[Рис. 4. Внешний вид покрытого «горячего» включения hp-1801 (A) и «холодного» камешка cp-1101 (C) и их рентгеновское изображение (B) и (D). Рентгеновские снимки были сделаны с помощью аппарата Evolution X 3000-2C (New Life Radiology SRL, Италия) при силе тока трубки 8 мА, напряжении на трубке 70 кВ и расстоянии «фокус трубки–пленка» 25 см. Мерный отрезок равен 1 см]

Results and discussion

Gamma-ray spectroscopy

An example of a comparison of gamma spectra measured from a reference sample of native soil (weight 324.0 g), an aliquot (mass of 50.0 g) of sieved fraction of the same soil, and a combined sample of coated «hot» inclusions (mass of 13.53 g) is provided in Figure 5. The spectra are shown after subtraction of the background spectrum and normalization for the mass of the counting sample (per 1.0 g) and for the measurement time (per 10000 s). The 661.6 keV peak of ^{137}Cs clearly dominates in the spectrum from the native soil. It is also possible to confidently identify and, accordingly, quantify the activity of ^{60}Co (the 1173.2 keV and 1332.5 keV peaks) and ^{241}Am (the 59.5 keV peak). In the spectrum from the sieved sample, the peak of ^{137}Cs stands out even more clearly due to the decrease in the amplitude of the characteristic peaks of ^{60}Co and ^{241}Am . In the spectrum from «hot» inclusions, the amplitudes of the peaks of ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{241}Am are roughly the same. The amplitudes of these peaks (especially 59.5 keV, 1173.2 keV, and 1332.5 keV) were many times higher in this spectrum compared to those in the spectrum measured from native soil.

Activity concentrations of radionuclides

Table 1 shows summarized results of measurements of the radionuclides ACs in samples of the sieved soil and in the coated «hot» inclusions. Table 1 also contains previously published data on ACs of the radionuclides in samples of the nonfractionated native soil [5] and in the glassy «hot» inclusions collected from the same samples [17].

The ACs of all three studied radionuclides were statistically significantly lower (nonparametric sign test, $P < 0.01$) in the sieved soil compared to the native soil (Table 2). The differences between native soil and sieved soil were higher than a factor of two for ^{60}Co and ^{241}Am , while for ^{137}Cs , the average difference was only 15%. If one takes ^{137}Cs as the reference radionuclide, it can be seen (Table 3) that the sieved soil, in comparison with the original soil, was significantly depleted of ^{60}Co and ^{241}Am . At the same time, the ratio of the ^{60}Co AC to the ^{241}Am AC did not change (Table 3).

Expectedly (considering the results of gamma-ray spectroscopy, see above), the radionuclides ACs were higher in the coated «hot» inclusions compared to the native soil. Particularly pronounced differences (more than an order of magnitude) were observed for ^{60}Co and ^{241}Am . Similar differences can be seen between the native soil and the glassy «hot» inclusions (Tables 1 and 2). It should be noted that the AC of ^{137}Cs was twice as high in the coated inclusions compared to the glassy inclusions.

The treatment of three coated «hot» inclusions with ultrasound in the aqueous medium resulted in a slight decrease in mass (by 8.7%) due to the separation of soil particles from the surface of the items (Table 4). This was accompanied by a decrease in the activity of ^{137}Cs in all inclusions (by an average of -18%). There was also a downward trend (-4%) for ^{60}Co ; for ^{241}Am , no declining change in activity was observed (+4%). A small part of the mass (-2.4%) was also separated from the «cold» pebble (Fig. 2C) during the ultrasonic treatment, while the activity of ^{137}Cs decreased by 21%. The residual activity of ^{137}Cs in the pebble may be due to the soil particles retention in the numerous cracks (Fig. 2D) which are difficult to clean with this method.

Для определения степени кислотной выщелачиваемости радионуклидов, одно из крупных покрытых «горячих» включений (масса=1,2 г), взятых с глубины 4–6 см, было растерто в ступке до размеров частиц 1 мм и менее. Измельченный образец был смешан с 6Н НСl в соотношении 1:10 (по массе) и помещен в кипящую водяную баню на 1,5 часа. После промывки в дистиллированной воде твердая фаза была осаждена на бумажном фильтре (белая лента) и озолена вместе с фильтром при температуре 400 °С. Аналогичная процедура была применена к аликвоте (масса = 10 г) просеянного образца почвы, отобранной также с глубины 4–6 см. Активности ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am в каждом образце были измерены по методу, описанному в работе [17], до и после обработки ультразвуком или кислотой.

После стачивания до середины с помощью абразивного инструмента внутри покрытых «горячих» включений была видна структура губчатого стекловидного материала (рис. 3В). Наличие стекловидного материала в «горячих» включениях может быть связано с выбросом такого вещества из зоны взрыва на поверхность земли [17]. Неравномерная плотность вещества и везикулярные структуры внутри «горячих» включений были различимы и при просвечивании таких образцов рентгеновскими лучами (рис. 4В). Для «холодных» включений, которые представляли собой камешки, покрытые тонким слоем прилипшей почвы, была характерна равномерная плотность вещества внутренней структуры (рис. 4С, D).

Результаты и обсуждение

Гамма-спектроскопия

Пример сравнения гамма спектров, измеренных от исходного образца нативной почвы (масса 324,0 г), аликвоты (масса 50,0 г) мелкодисперсной просеянной фракции этой же почвы и объединенного образца «горячих» включений (масса 13,53 г), приведен на рисунке 5. Спектры показаны после поканального вычитания фонового спектра, нормирования на массу счетного образца (на 1,0 г) и для времени измерения 10000 с. В спектре от нативной почвы по амплитуде явно доминирует пик с энергией 661,6 кэВ от ^{137}Cs . Кроме того, можно уверенно идентифицировать и, соответственно, количественно оценить активность ^{60}Co (пики 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ) и ^{241}Am (пик 59,5 кэВ). На спектре от просеянного образца пик от ^{137}Cs выделяется еще более отчетливо за счет уменьшения амплитуды характерных пиков ^{60}Co и ^{241}Am . На спектре от «горячих» включений амплитуды пиков от ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{241}Am примерно совпадают друг с другом; при этом, по сравнению со спектром, измеренном от нативной почвы, амплитуда этих пиков (в особенности 59,5 кэВ, 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ) была многократно выше.

Удельная активность радионуклидов

Обобщенные результаты измерений УА радионуклидов в образцах просеянной почвы и покрытых «горячих» включений приведены в таблице 1. Там же даны ранее опубликованные данные об УА радионуклидов в образцах исходной нативной почвы [5] и в радиоактивных стекловидных включениях, извлеченных из этих образцов [17].

В просеянной почве, по сравнению с нативной почвой, УА всех трех изученных радионуклидов была статистически значимо ниже (непараметрический тест знаков, $P < 0,01$) (табл. 2).

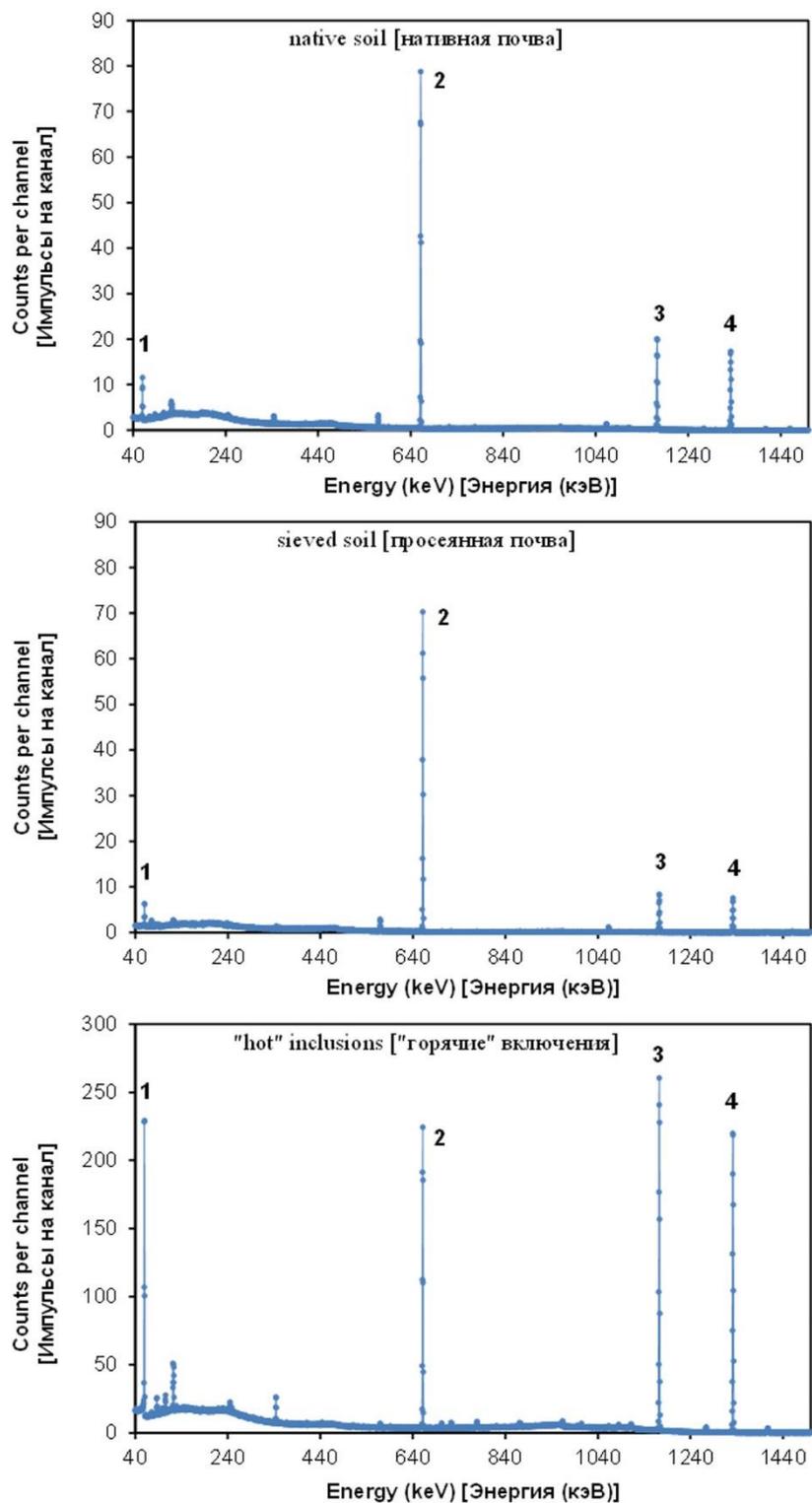


Fig. 5. Spectra from the native soil sample (depth 10–12 cm), the sieved soil sample (depth 10–12 cm) and the pulled sample of 29 coated "hot" inclusions from Plot No. 2. Reference peaks and the corresponding technogenic radionuclides are indicated as follows: (1) 59.5 keV, ^{241}Am ; (2) 661.6 keV, ^{137}Cs ; (3) 1173.2 keV, ^{60}Co ; (4) 1332.5 keV, ^{60}Co

[Рис. 5. Спектры от образца нативной почвы (глубина 10–12 см), образца просеянной почвы (глубина 10–12 см) и объединенного образца 29 покрытых «горячих» включений с участка № 2. Опорные пики и соответствующие техногенные радионуклиды обозначены следующим образом: (1) 59,5 кэВ, ^{241}Am ; (2) 661,6 кэВ, ^{137}Cs ; (3) 1173,2 кэВ, ^{60}Co ; (4) 1332,5 кэВ, ^{60}Co]

Table 1

Summarized results of the gamma-spectrometric analysis of native soil, sieved soil, and «hot» radioactive inclusions. Mean \pm standard deviation. Range is given in brackets. The activity concentrations are provided on August 5, 2009 (the data of the native soil sampling)

[Таблица 1

Сводные результаты гамма-спектрометрического анализа нативной почвы, просеянной почвы и «горячих» радиоактивных включений. Среднее \pm стандартное отклонение. Диапазон указан в скобках. Удельная активность приведена на 5 августа 2009 года (дата отбора нативной почвы)]

Sample [Образец]	Mass (g; d.w.) [Масса (г; с.в.)]	Activity concentration (Bq/g; d.w.) [Удельная активность (Бк/г; с.в.)]		
		¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	²⁴¹ Am
Native soil [Нативная почва] (n = 10)*	340 \pm 33 (264–400)	3.62 \pm 0.43 (2.96–4.05)	1.17 \pm 0.30 (0.62–1.47)	3.24 \pm 1.16 (1.81–5.80)
Sieved soil [Просеянная почва] (n = 10)	271 \pm 27 (206–308)	3.09 \pm 0.42 (2.23–3.60)	0.54 \pm 0.13 (0.32–0.70)	1.28 \pm 0.31 (0.74–1.72)
Combined sample of 29 coated «hot» inclusions [Объединенный образец из 29 покрытых «горячих» включений]	13.53	11.4 \pm 1.4***	20.9 \pm 2.6***	51.5 \pm 6.2***
Individual glassy «hot» inclusions [Индивидуальные стекловидные «горячие» включения] (n = 7)**	1.16 \pm 2.43 (0.065–6.66)	5.48 \pm 1.21 (4.02–7.89)	15.0 \pm 4.5 (8.7–21.9)	70.2 \pm 28.3 (31.2–107)

* – reference [5] [ссылка [5]].

** – reference [17] [ссылка [17]].

*** – total measurement uncertainty (2 sigma at 95% probability) [общая неопределенность измерения (2 сигма при 95% вероятности)].

Table 2

Comparison of native soil, sieved soil, and «hot» radioactive inclusions in terms of activity concentrations (ACs) of the technogenic radionuclides

[Таблица 2

Сравнение нативной почвы, просеянной почвы и «горячих» радиоактивных включений по показателю удельной активности (УА) техногенных радионуклидов]

Samples for comparison [Сравниваемые образцы]	Ratio of ACs for the radionuclide [Отношение УА для радионуклида]		
	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	²⁴¹ Am
Sieved soil /Native soil [Просеянная почва/Нативная почва]	0.85	0.46	0.40
Coated inclusions/Native soil [Покрытые включения/Нативная почва]	3.1	18	16
Glassy inclusions/Native soil [Стекловидные включения/Нативная почва]	1.5	13	22

Table 3

The ratio of the activity concentration (AC) values of ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co and ²⁴¹Am in native soil, sieved soil, and «hot» radioactive inclusions

[Таблица 3

Соотношение значений удельной активности (УА) ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co и ²⁴¹Am в нативной почве, просеянной почве и «горячих» радиоактивных включениях]

Sample [Образец]	Ratio of AC values [Соотношение значений УА]		
	⁶⁰ Co/ ¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am/ ¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am/ ⁶⁰ Co
Native soil [Нативная почва]	0.32	0.90	2.8
Sieved soil [Просеянная почва]	0.17	0.41	2.4
Coated inclusions [Покрытые включения]	1.8	4.5	2.5
Glassy inclusions [Стекловидные включения]	2.7	13	4.7

Table 4

Effect of sonication and treatment with HCl on mass and radioactivity of the soil components from the «Taiga» PNE site. The activities and masses (dry weight) are shown before (the first number) and after (the second number) the treatment

[Таблица 4

Влияние воздействия ультразвуком и HCl на массу и радиоактивность компонентов почвы с места проведения МЯВ «Тайга». Активность и масса (сухой вес) показаны до (первое число) и после (второе число) обработки]

Code, type of inclusion [Код, тип включения]	Mass (g), and change in the mass (in brackets, %) [Масса (г) и изменение массы (в скобках, %)]	Activity (Bq)*, and change in the activity (in brackets, %) [Активность (Бк)* и изменение активности (в скобках, %)]		
		¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	²⁴¹ Am
<i>Sonication [Воздействие ультразвуком]</i>				
HP-2702, «hot» coated [«горячее» покрытое]	0.300/0.281 (6.3)	2.78/1.64 (41)	4.54/4.20 (7.4)	9.7/10.5 (+7.6)
HP-2802, «hot» coated [«горячее» покрытое]	0.217/0.195 (10)	11.5/10.9 (5.3)	11.3/11.2 (0.9)	33.5/35.0 (+4.4)
HP-2302, «hot» coated [«горячее» покрытое]	0.198/0.179 (9.6)	2.82/2.60 (7.8)	7.01/6.75 (3.7)	19.4/19.4 (0)
HP-0203a, «hot» glassy [«горячее» стекловидное]**	0.196/0.192 (2.0)	1.14/1.04 (8.7)	3.55/3.41 (3.9)	18.0/17.6 (2.2)
wp-1402, «cold» pebble [«холодный» камешек]	3.884/3.790 (2.4)	2.01/1.59 (21)	n.d.	n.d.
<i>Treatment with HCl [Воздействие HCl]</i>				
RH-1, «hot» coated [«горячее» покрытое]	1.18/1.16 (1.7)	12.9/9.5 (26)	71.1/72.7 (+2.3)	31.5/30.4 (3.5)
SS-4-6, sieved soil [просеянная почва]	10.36/9.90 (4.4)	34.0/10.4 (69)	18.5/17.9 (3.2)	7.77/7.09 (8.8)

n.d. – not determined [n.d. – не определено].

* – the counting uncertainty (at 1 sigma level) of the activity measurement was not more than 10% [статистическая неопределенность (на уровне 1 сигма) измерения активности не превышала 10%].

** – reference [17] [ссылка [17]].

From Table 4, it is visible that during exposure to concentrated acid, the retention of ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am by the “coated” inclusion is higher than that by the sieved soil. ¹³⁷Cs is the most mobile radionuclide in the acidic environment in both cases.

On the basis of the results obtained, it can be assumed that the refractory and hard-to-volatile elements cobalt (boiling temperature, T_{boil} = 2927 °C) and americium (T_{boil} = 2011 °C) are concentrated in the vitreous material, while the comparatively volatile element cesium (T_{boil} = 671 °C) [19] is more associated with the soil. Note that only a small fraction of ¹³⁷Cs is formed directly (independently) and almost instantaneously as a result of nuclear fission of ²³⁵U or ²³⁹Pu [20]. It may play a role in the more uniform spatial distribution of ¹³⁷Cs (compared to ⁶⁰Co and ²⁴¹Am) between the structural components of native soil. Predominantly, ¹³⁷Cs is formed from the decay of the chain of the short-lived fission products: ¹³⁷Te (T_{1/2} = 4 s) – ¹³⁷I (T_{1/2} = 24.1 s) – ¹³⁷Xe (T_{1/2} = 3.8 min) – ¹³⁷Cs (T_{1/2} = 30.17 y) [21]. Iodine is a volatile element (T_{boil} = 184 °C), and xenon is an inert gas. Hence, there was a possibility of their propagation over large volumes of the soil, ejected by the explosions of the «Taiga» experiment, with the subsequent deposition of a significant portion of ¹³⁷Cs outside the blast zone and the glassy mass.

Conclusion

In accordance with the purpose of the study, the activity concentrations of ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am in native soil, sieved soil and the screened out coarse components were compared. The soil samples, that had been taken from the heap of radioactively

Однако, если в отношении ¹³⁷Cs эта разница в среднем составила всего 15%, то для ⁶⁰Co и ²⁴¹Am различия между нативной и просеянной почвой были более чем двукратными. Если взять ¹³⁷Cs за реперный радионуклид, то видно (табл. 3), что просеянная почва, по сравнению с исходной почвой, была существенно обеднена ⁶⁰Co и ²⁴¹Am. При этом соотношение между значениями УА ⁶⁰Co и ²⁴¹Am не изменилось (табл. 3).

В покрытых «горячих» включениях значения УА радионуклидов были ожидаемо (учитывая результаты гамма-спектроскопии) выше, чем таковые в нативной почве. Особенно весомые различия (более порядка величины) наблюдались для ⁶⁰Co и ²⁴¹Am. Сходные различия можно видеть при сравнении нативной почвы и стекловидных «горячих» включений (табл. 1 и 2). Отметим, что УА ¹³⁷Cs в покрытых включениях, по сравнению со стекловидными включениями, была в два раза выше.

При обработке трех покрытых «горячих» включений ультразвуком в водной среде происходило незначительное уменьшение массы (в среднем на 8,7%) (табл. 4) за счет отделения частичек почвы от поверхности образцов. Это сопровождалось снижением активности ¹³⁷Cs во всех включениях (в среднем на –18%). Для ⁶⁰Co также можно говорить о тенденции к снижению активности (–4%); для ²⁴¹Am изменений активности в сторону уменьшения не наблюдалось (+4%). От «холодного» камешка (рис. 2С) при ультразвуковой обработке также отделилась небольшая часть массы (–2,4%). Активность ¹³⁷Cs снизилась на 21%. Остаточная активность ¹³⁷Cs, возможно, связана с почвой, проникшей в многочисленные трещины (рис. 2D), недоступные для очистки использованным методом.

contaminated ground at the «Taiga» PNE site, were passed through a sieve with a mesh size of 1.2 mm. The sieved soil fraction, compared to the original native soil, is characterized by statistically significantly lower AC values of ^{137}Cs (factor of 1.2), ^{60}Co (factor of 2.2), and ^{241}Am (factor of 2.6).

Numerous solid radioactive inclusions containing a vitreous substance were detected during analysis of the screened out coarse fraction. The AC values of ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{241}Am in the radioactive inclusions were significantly higher compared to those in the native soil, with the differences being most noticeable (more than an order of magnitude) for the refractory and hard-to-volatile ^{60}Co and ^{241}Am . These radionuclides were apparently concentrated in the vitreous substance.

In general, our study revealed a very pronounced uneven distribution of ^{60}Co and ^{241}Am between various structural components of the soil at the «Taiga» PNE site. A less pronounced unevenness was found with respect of the ^{137}Cs distribution.

In methodological terms, the study reveals that the use of only sieved soil samples to determine the levels of radioactive contamination leads to a significant underestimation of the content of ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{241}Am in the soil at the «Taiga» site. This, in turn, indicates the need to analyze the content of the technogenic radionuclides in the screened out coarse inclusions. However, for a general assessment of the content of gamma-emitting radionuclides in the soil, it is quite sufficient to measure samples of unfractionated soil collected directly at the PNE site. Fractionation, in particular, sieving of the material of native samples can be useful (or even necessary) in: 1) study of radionuclides speciation in soil, 2) study of radionuclides transfer in the soil-vegetation system, and 3) radiochemical studies.

Authors' personal contribution

Ramzaev V.P. – conceptualization, soil sampling at the «Taiga» site, measurements, writing the manuscript.

Repin V.S. – conceptualization, soil sampling at the «Taiga» site, editing the manuscript.

Acknowledgements

The authors thank the anonymous reviewers for their helpful comments that improved the quality of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

Sources of funding

The study was performed 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: «Improving and developing methods for monitoring of environmental media in areas where peaceful nuclear explosions were performed. Radiation-hygienic characteristics of sources of drinking water supply».

References

- Gedeonov AD, Petrov ER, Alexeev VG, Kuleshova IN, Savopulo ML, Burtsev IS, et al. Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites «Craton-3» and «Crystal» in the Republic of Sakha (Yakutia). *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;60: 221–234.
- Gedeonov AD, Petrov ER, Savopulo MI, Shkroev VY. Plutonium-239, 240, plutonium-238 and γ -emitting radionuclides in

Из таблицы 4 видно, что при воздействии концентрированной кислотой прочность удержания ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am «покрытой» частицей выше, чем просеянной почвой. При этом наиболее мобильным в кислой среде является ^{137}Cs .

На основании полученных результатов можно допустить, что тугоплавкие и труднолетучие элементы кобальт (температура кипения, $T_{\text{кип}} = 2927\text{ }^\circ\text{C}$) и америций ($T_{\text{кип}} = 2011\text{ }^\circ\text{C}$) концентрируются в стекловидной массе, в то время как сравнительно более летучий элемент цезий ($T_{\text{кип}} = 671\text{ }^\circ\text{C}$) [19] в большей степени ассоциируется с почвой (грунтом). Определенную роль в более равномерном пространственном распределении ^{137}Cs (по сравнению с ^{60}Co и ^{241}Am) между структурными компонентами нативной почвы играет и то обстоятельство, что только небольшая доля ^{137}Cs образуется напрямую (термин «independently» в англоязычной литературе) и практически мгновенно в результате ядерного деления ^{235}U или ^{239}Pu [20]. Преимущественно же ^{137}Cs образуется в результате распада цепочки короткоживущих продуктов деления: ^{137}Te ($T_{1/2} = 4\text{ с}$) – ^{137}I ($T_{1/2} = 24,1\text{ с}$) – ^{137}Xe ($T_{1/2} = 3,8\text{ мин}$) – ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17\text{ года}$) [21]. Йод является легколетучим элементом ($T_{\text{кип}} = 184\text{ }^\circ\text{C}$), а ксенон – инертным газом. Отсюда и возможность их распространения по большим объемам грунта, выброшенного в результате взрывов эксперимента «Тайга», и последующего осаждения значительной части ^{137}Cs за пределами зоны взрыва вне стекловидной массы.

Заключение

В соответствии с целью работы было выполнено сравнение удельной активности ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am в нативной почве, просеянной почве и отсеянных твердых почвенных компонентах. Образцы почвы, отобранной на навале радиоактивно загрязненного грунта в месте проведения МЯВ «Тайга», были просеяны через сито с размером ячеек 1,2 мм. По сравнению с исходной нативной почвой, просеянная фракция почвы характеризуется статистически значимо меньшими величинами УА ^{137}Cs (в 1,2 раза), ^{60}Co (в 2,2 раза) и ^{241}Am (в 2,6 раза).

При анализе отсеянной крупнодисперсной фракции были обнаружены многочисленные твердые радиоактивные включения, содержащие стекловидное вещество. Значения УА ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{241}Am во включениях были существенно выше таковых в нативной почве, причем различия были наиболее заметными (более порядка величины) для тугоплавких и труднолетучих ^{60}Co и ^{241}Am . Эти радионуклиды, очевидно, концентрировались в стекловидном веществе.

В целом наше исследование выявило весьма неравномерное распределение ^{60}Co и ^{241}Am между различными структурными элементами почвы на объекте «Тайга». Для ^{137}Cs эта неравномерность также существует, но она менее выражена.

В методическом плане, выполненное исследование позволяет прийти к выводу, что использование только образцов просеянной почвы для измерения уровней радиоактивного загрязнения ведет к существенной недооценке содержания ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{241}Am в почве на объекте «Тайга». Это, в свою очередь, указывает на необходимость анализировать содержание техногенных радионуклидов в отсеянных почвенных включениях. Вместе с тем, для общей оценки содержания гамма-излучающих радионуклидов в почве вполне достаточным является измерение образцов нефракционированной почвы, отобранной непосредственно на объекте МЯВ. Фракционирование, в частности, просеивание, материала нативных проб может быть полезным

- environmental samples near peaceful underground nuclear explosion site «Taiga» (European North-East Russia). In: Borretzen P, Jolle T, Strand P. (Eds.). Proceedings from the International Conference on Radioactivity in the Environment, 1–5 September, 2002, Monaco.
- Lurie AA. Radioecological study of consequences of the underground nuclear explosions with soil excavation in the North of the Perm Region. Part 1. Surface radionuclide contamination (soil, water, bottom sediments). *ANRI = ANRI*. 2002(2): 21–30. (In Russian).
 - Ramzaev V, Mishine A, Golikov V, Strand P, Brown J. Surface ground contamination and soil vertical distribution of ^{137}Cs around two underground nuclear explosion sites in the Asian Arctic, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007;92: 123–143.
 - Ramzaev V, Repin V, Medvedev A, Khramtsov E, Timofeeva M, Yakovlev V. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012;109: 1–12.
 - Tsvetnova OB, Aleksandrov MN, Shcheglov AI. Modern radioecological situation at the site «Globus-1». *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye = Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2013;(2): 11–16. (In Russian).
 - Chevychelov AP, Sobakin PI. The migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soil-vegetation cover at accidental underground nuclear explosion site «Kraton 3». *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Forest Journal*. 2017;(6): 64–75. (In Russian).
 - Lukashenko S, Kabdyrakova A, Lind OC, Gorchachev I, Kunduzbayeva A, Kvochkina T, et al. Radioactive particles released from different sources in the Semipalatinsk Test Site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;216: 106160.
 - Mabit L, Bernard C, Laverdière MR. Quantification of soil redistribution and sediment budget in a Canadian watershed from fallout caesium-137 (^{137}Cs) data. *Canadian Journal of Soil Science*. 2002;82: 423–431.
 - Sakaguchi A, Yamamoto M., Hoshi M, Imanaka T, Apsalikov KN, Gusev BI. Radiological situation in the vicinity of Semipalatinsk Nuclear Test Site: Dolon, Mostik, Cheremushka and Budene settlements. *Journal of Radiation Research*. 2006;47(Suppl.): A101–A116.
 - Straume T, Anspaugh LR, Marchetti AA, Voigt G, Minenko V, Gu F, et al. Measurement of ^{129}I and ^{137}Cs in soils from Belarus and reconstruction of ^{131}I deposition from the Chernobyl accident. *Health Physics*. 2006;91(1): 7–19.
 - Kashparov V, Levchuk S, Zhurba M, Protsak V, Khomutinin Yu, Beresford NA, et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data*. 2018;10: 339–353.
 - Panitskiy A, Syssoeva Y, Baigazy S, Kunduzbayeva A, Kenzhina L, Polivkina Y, et al. Vertical distribution of radionuclides in soil at the Semipalatinsk Test Site beyond its test locations. *PLoS ONE*. 2023;18(1): 0278581.
 - Duc HH, Cuong PV, Loat BV, Anh LT, Minh ND, Khiem LH. Correlation between ^{137}Cs and ^{40}K concentration in soil and tea tree in Luong My Farm, Hoa Binh Province, Vietnam. *Communications in Physics*. 2019;29(4): 527–539.
 - Zhang XC, Polyakov VO, Liu BY, Nearing MA. Quantifying geostatistical properties of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ at small scales for improving sampling design and soil erosion estimation. *Geoderma*. 2019;334: 155–164.
 - International Atomic Energy Agency. Soil sampling for environmental contaminants. IAEA-TECDOC-1415. IAEA, Vienna, Austria, 2004.
 - Ramzaev VP, Repin VS. Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the “Taiga” peaceful underground nuclear explosion site (the Perm region, Russia). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 148–159.
- (или даже необходимым) при изучении форм нахождения радионуклидов в почве, при изучении их биологической подвижности в системе почва–растительность и при проведении радиохимических исследований.
- Полученные результаты следует учитывать при разработке методических указаний по организации радиационного контроля в местах проведения МЯВ.
- Сведения о личном вкладе авторов**
- В.П. Рамзаев – концептуализация, отбор проб на объекте «Тайга», измерения, написание рукописи.
- В.С. Репин – концептуализация, отбор проб на объекте «Тайга», редактирование рукописи.
- Благодарности**
- Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за конструктивные комментарии, которые позволили улучшить качество рукописи.
- Информация о конфликте интересов**
- У авторов нет конфликта интересов, которые следует раскрывать.
- Сведения об источнике финансирования**
- Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно–эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно–гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».
- Литература**
- Gedeonov A.D., Petrov E.R., Alexeev V.G. et al. Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites «Craton-3» and «Crystal» in the Republic of Sakha (Yakutia) // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002. Vol. 60. P. 221–234.
 - Gedeonov A.D., Petrov E.R., Savopulo M.I., Shkroev V.Y. Plutonium-239, 240, plutonium-238 and γ -emitting radionuclides in environmental samples near peaceful underground nuclear explosion site «Taiga» (European North-East Russia). In: Borretzen P., Jolle T., Strand P. (Eds.). Proceedings from the International Conference on Radioactivity in the Environment, 1–5 September, 2002, Monaco.
 - Лурье А.А. Радиоэкологическое исследование последствий подземных ядерных взрывов с выбросом грунта на севере Пермской области. Часть 1. Радионуклидное загрязнение местности (почва, вода, донные отложения) // *АНРИ*. 2002. № 2. С. 21–30.
 - Ramzaev V., Mishine A., Golikov V. et al. Surface ground contamination and soil vertical distribution of ^{137}Cs around two underground nuclear explosion sites in the Asian Arctic, Russia // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007. Vol. 92. P. 123–143.
 - Ramzaev V., Repin V., Medvedev A. et al. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 109. P. 1–12.
 - Цветнова О.Б., Александров М.Н., Щеглов А.И. Современная радиэкологическая обстановка на территории объекта «Глобус-1» // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2013. № 2. С. 11–16.

18. Peaceful Nuclear Explosions: Guarantees of General and Radiation Safety / Ed. Prof. Logachev VA. Moscow, Izd.AT; 2001. 519 p. Available from: http://elib.biblioatom.ru/text/mirnye-yadernye-vzryvy_2001 (Accessed 12.10.2023). (In Russian).
19. Boiling Point of the elements. Available from: <https://periodictable.com/Properties/A/BoilingPoint.al.html> (Accessed: 02.12.2023).
20. Doran HR, Cresswell AJ, Sanderson DCW, Falcone G. Nuclear data evaluation for decay heat analysis of spent nuclear fuel over 1–100 k year timescale. *European Physical Journal Plus*. 2022;137: 665.
21. Cao Y, Zhou L, Ren H, Zou H. Determination, separation and application of ^{137}Cs : a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19: 10183.
7. Чевычелов А.П., Собакин П.И. Миграция ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвенно-растительном покрове объекта аварийного подземного ядерного взрыва «Кратон-3» // Сибирский лесной журнал. 2017. № 6. С. 64–75.
8. Lukashenko S., Kabdyrakova A., Lind O.C. et al. Radioactive particles released from different sources in the Semipalatinsk Test Site // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 216. P. 106160.
9. Mabit L., Bernard C., Laverdière M.R. Quantification of soil redistribution and sediment budget in a Canadian watershed from fallout caesium-137 (^{137}Cs) data // *Canadian Journal of Soil Science*. 2002. Vol. 82. P. 423–431.
10. Sakaguchi A., Yamamoto M., Hoshi M. et al. Radiological situation in the vicinity of Semipalatinsk Nuclear Test Site: Dolon, Mostik, Cheremushka and Budene settlements // *Journal of Radiation Research*. 2006. Vol. 47, Suppl. P. A101–A116.
11. Straume T., Anspaugh L.R., Marchetti A.A. et al. Measurement of ^{129}I and ^{137}Cs in soils from Belarus and reconstruction of ^{131}I deposition from the Chernobyl accident // *Health Physics*. 2006. Vol. 91, No. 1. P. 7–19.
12. Kashparov V., Levchuk S., Zhurba M. et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone // *Earth System Science Data*. 2018. Vol. 10. P. 339–353.
13. Panitskiy A., Syssoeva Y., Baigazy S. et al. Vertical distribution of radionuclides in soil at the Semipalatinsk Test Site beyond its test locations // *PLoS ONE*. 2023. Vol. 18, No. 1. P. e0278581.
14. Duc H.H., Cuong P.V., Loat B.V. et al. Correlation between ^{137}Cs and ^{40}K concentration in soil and tea tree in Luong My Farm, Hoa Binh Province, Vietnam // *Communications in Physics*. 2019. Vol. 29, No. 4. P. 527–539.
15. Zhang X.C., Polyakov V.O., Liu B.Y., Nearing M.A. Quantifying geostatistical properties of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ at small scales for improving sampling design and soil erosion estimation // *Geoderma*. 2019. Vol. 334. P. 155–164.
16. International Atomic Energy Agency. Soil sampling for environmental contaminants. IAEA-TECDOC-1415. IAEA, Vienna, Austria, 2004.
17. 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.
18. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Колл. авторов под рук. проф. В.А. Логачева. М.: Изд.АТ, 2001. 519 с. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/mirnye-yadernye-vzryvy_2001 (Дата обращения: 12.10.2023).
19. Boiling Point of the elements. URL: <https://periodictable.com/Properties/A/BoilingPoint.al.html> (Дата обращения: 02.12.2023).
20. Doran H.R., Cresswell A.J., Sanderson D.C.W., Falcone G. Nuclear data evaluation for decay heat analysis of spent nuclear fuel over 1–100 k year timescale // *European Physical Journal Plus*. 2022. Vol. 137. P. 665.
21. Cao Y., Zhou L., Ren H., Zou H. Determination, separation and application of ^{137}Cs : a review // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. P. 10183.

Received: March 1, 2024

Поступила: 01.03.2024

For correspondence: Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher, External Exposure 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 (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru)

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

For citation: Ramzaev V.P., Repin V.S. 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. Vol. 17, No 3. P. 79–92. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-79-92.

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: 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.

Анализ распространенности аварийных ситуаций в ядерной медицине в Российской Федерации

А.В. Водоватов^{1,2}, Л.А. Чипига^{1,3,4}, С.А. Рыжов^{5,6,7}, А.В. Петрякова^{1,8}, А.М. Библин¹,
Г.А. Горский^{1,9}, Н.М. Вишнякова¹

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

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

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

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

⁵ Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Россия

⁶ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дмитрия Рогачева Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

⁷ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

⁸ Городская больница №40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

⁹ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

При использовании источников ионизирующего излучения в медицине в общем и процедур ядерной медицины, в частности, могут возникать нештатные ситуации (радиационные и нерадиационные аварии и происшествия). Для минимизации негативного воздействия на пациентов, персонал и население за счёт таких ситуаций необходимо обладать достоверной информацией о реальной распространённости аварийных ситуаций. В работе был выполнен анализ радиационных аварий с медицинскими источниками ионизирующего излучения, зарегистрированных в «Банке данных радиационных аварий и инцидентов» Информационно-аналитического центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности, и результатов анкетирования персонала, проведенного в 25 отделениях ядерной медицины (около 30% от числа всех отделений ядерной медицины в Российской Федерации). Результаты анализа радиационных аварий в банке данных показали, что наиболее распространёнными зарегистрированными радиационными авариями являются: выявление пассажиров с превышением мощности дозы внешнего излучения и выявление отходов, загрязнённых медицинскими радионуклидами. По результатам анкетирования выявлено, что наиболее распространёнными аварийными ситуациями в ядерной медицине являются загрязнение рабочей одежды или рабочих поверхностей радионуклидами, или биологическими жидкостями пациента, содержащими радионуклиды; проведение процедур ядерной медицины без необходимого обоснования, и экстравазальное введение радиофармацевтического лекарственного препарата. Существующие системы выявления и регистрации радиационных аварий не позволяют определить аварийные ситуации, специфические для ядерной медицины. Целесообразно провести дальнейшие исследования, направленные на разработку классификации аварийных ситуаций при медицинском облучении, и методик по реагированию при наступлении таких ситуаций.

Ключевые слова: радиационная авария, радиационное происшествие, медицинское облучение, пациенты, персонал.

Введение

При проведении рентгенорадиологических исследований часто могут возникать нештатные ситуации (радиационные и нерадиационные аварии и происшествия) [1-3]. Данные нештатные ситуации включают в себя события с

различной степенью радиационного воздействия на пациентов, персонал и население. Снижение вероятности возникновения таких ситуаций, а в идеальном случае - и полное их исключение, является одной из основных задач обеспечения радиационной безопасности при медицин-

Водоватов Александр Валерьевич

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

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

ском облучении [4,5]. Выявление, идентификация, реагирование и профилактика возникновения нештатных ситуаций в соответствии с действующими нормативно-методическими документами является частью программы обеспечения качества в лучевой диагностике и терапии¹ [6,7].

Ядерная медицина связана с применением современных комплексных высокодозовых и высокоинформативных технологий [8,9]. Проведение радионуклидной диагностики и терапии связано с большим количеством нештатных ситуаций по сравнению с другими методами медицинской визуализации. Их число возможно будет возрасти при внедрении новых технологий в практику (например, при проведении радионуклидной терапии в отделениях радионуклидной диагностики или при применении новых радиофармацевтических лекарственных препаратов (РФЛП)). Ошибки при введении пациентам диагностических и терапевтических РФЛП будут ассоциированы с более серьезными последствиями по сравнению с рентгеновской диагностикой [10-12]. Таким образом, идентификация и анализ различных нештатных ситуаций при проведении процедур ядерной медицины в данный момент являются приоритетными.

Как уже было показано в предыдущих работах авторов [13,14], отечественные и международные подходы к идентификации нештатных ситуаций при медицинском облучении существенно различаются. Главным отличием является отнесение всех нештатных ситуаций при медицинском облучении в Российской Федерации к радиационным². Данный подход является излишне жестким и может приводить к сокрытию или игнорированию большинства нештатных ситуаций в лучевой диагностике и терапии.

Все нештатные ситуации с пациентами, связанные с медицинским облучением в Российской Федерации принято воспринимать в качестве побочных эффектов процедуры (т.е. использовать тот же подход, что и при проведении фармакотерапии). При этом зачастую игнорируется планируемый характер облучения пациента и, как следствие, возможность проведения исследования таким образом, чтобы снизить степень выраженности негативных эффектов, или исключить их, а также заранее принять меры по снижению негативных последствий [15]. Согласно отечественным нормативно-методическим документам по обеспечению радиационной безопасности в радионуклидной диагностике радиационные инциденты, связанные с ошибочным введением РФЛП пациенту и облучением пациента в дозе ниже 200 мЗв, могут не трактоваться как радиационная авария и информирование о них органов Роспотребнадзора не происходит, информация о них не поступает в банк данных радиационных аварий. Также, розлив РФЛП и загрязнение поверхностей растворами с короткоживущими радионуклидами, может не рассматриваться как инцидент, требующий информирования, что, однако, является нарушением требований

санитарно-эпидемиологического законодательства^{3,4,5}.

Для разработки и научного обоснования единого подхода к идентификации, реагированию и предотвращению нештатных ситуаций (радиационных аварий и происшествий) при медицинском облучении в общем и в ядерной медицине, в частности, целесообразно проанализировать имеющиеся официальные данные по радиационным авариям при медицинском облучении, а также определить реальную распространенность различных нештатных ситуаций в отделениях ядерной медицины в Российской Федерации.

Целью данного исследования являлась оценка распространенности различных видов нештатных ситуаций в ядерной медицине по официальным данным и по результатам выполненного сбора данных в подразделениях ядерной медицины в отечественных медицинских организациях.

Материалы и методы

Анализ банка данных радиационных аварий

Для анализа имеющихся официальных данных по радиационным авариям в ядерной медицине были использованы сведения за период 2015–2022 гг., содержащиеся в «Банке данных радиационных аварий и инцидентов» Информационно-аналитического центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности, функционирующего на базе ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева [16]. Из всего объема донесений были выделены радиационные аварии, которые потенциально могли быть связаны с медицинскими источниками ионизирующего излучения.

После формирования первичной выборки радиационных аварий, удовлетворяющих вышеуказанным условиям, проводили дальнейший скрининг, направленный на исключение случаев, не связанных с медицинскими источниками ионизирующего излучения. Всего в финальную выборку вошло 217 официально зарегистрированных событий, зарегистрированных как радиационные аварии/инциденты.

Сбор данных (анкетирование) о нештатных ситуациях в ядерной медицине

Оценка реальной распространенности различных нештатных ситуаций в отделениях ядерной медицины в медицинских организациях в Российской Федерации проводилась путем онлайн-анкетирования персонала отделений с использованием анкет в сервисе Google.Forms⁶. Исследование проводилось в период с марта по май 2024 года, данные собирались анонимно (без указания организации, из которой были получены данные). Анкетирование было направлено на определение факта возникновения различных аварийных (нештатных) ситуаций в медицинских организациях и не подразумевало оценку абсолютного числа таких ситуаций и/или их распространенности.

Данные были получены из 25 медицинских организаций, что составляет около 25% от всех медицинских орга-

¹ МУК 2.6.7.3651-20 «Методы контроля качества в ПЭТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты». Методические указания. М.: Роспотребнадзор, 2020 [МУК 2.6.7.3651-20 "Quality control methods in PET diagnostics for optimization of radiation protection". Rosпотребнадзор, 2020 (In Russ.)]

² СанПиН 2.6.1.2523-09. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности. [Norms of the Radiation Safety NRB-99/2009 (In Russ.)]

³ Методические указания МУ 2.6.1.1892-04 "Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов" [МУ 2.6.1.1892-04 "Hygienic requirements on the provision of the radiation safety for the nuclear medicine diagnostics with radiopharmaceuticals" (In Russ.)]

⁴ СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии» [Sanitary Regulations and Standards SanPIN 2.6.1.3288-15 "Hygienic requirements on the provision of the radiation safety for the preparation and performance of the positron emission tomography" (In Russ.)]

⁵ СанПиН 2.6.1.2368-08 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников» (далее – СанПиН 2.6.1.2368-08). [Sanitary Regulations and Standards SanPIN 2.6.1.2368-08 "Hygienic requirements for radiation safety during radiation therapy using open radionuclide sources" (In Russ.)]

⁶ Доступно по ссылке: <https://forms.gle/kcQ9VZ6ibhr8HHs5> [Available from: <https://forms.gle/kcQ9VZ6ibhr8HHs5>]

низаций в Российской Федерации, с отделениями радионуклидной диагностики или терапии.

Анкета состояла из 36 вопросов и включала в себя 3 блока вопросов по нештатным ситуациям различного вида:

- нештатные ситуации, при которых возможно переоблучение персонала групп А и Б, а также медицинского персонала, относящегося к категории «население»;
- нештатные ситуации, при которых возможно переоблучение пациентов;
- нештатные ситуации, при которых возможно переоблучение населения после выписки пациента с введенным терапевтическим РФЛП.

Каждый блок включал в себя ситуации, относящиеся к радиационным авариям в соответствии с МУ 2.6.1.1892-04, СанПиН 2.6.1.3288-15 и СанПиН 2.6.1.2368-08, описанные в предыдущих работах авторов [13, 14].

Результаты анкетирования обрабатывали по медицинским организациям вне зависимости от числа различных подразделений ядерной медицины в этой организации.

Материалы исследования были подвергнуты статистической обработке. Накопление, корректировка, систематизация исходной информации и визуализация полученных результатов осуществлялись в электронных таблицах Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа данных из банка данных радиационных аварий и инцидентов Информационно-аналитического центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности представлены в таблице 1.

У всех пассажиров с превышением мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения над фоном при прохождении контроля на границе был идентифицирован ¹³¹I. При радиационном контроле бункеров мусоровозов с превышением МЭД гамма-излучения на свалках в 85% случаев были выявлены ¹³¹I и ^{99m}Tc, в единичных случаях - ¹⁷⁷Lu, ¹²³I и ¹⁵³Sm, а также несколько случаев выявления ⁹⁹Mo (как предшественника ^{99m}Tc). При расследовании этих аварий было выявлено, что данными радионуклидами загрязнены пеленки, подгузники, мочеприемники и иные изделия медицинского назначения. Один пассажир с превышением МЭД гамма-излучения был выявлен с ¹³¹I при прохождении контроля на мероприятии. При превышении МЭД гамма-

излучения от бака с фекалиями в поезде был выявлен ¹³¹I. При обнаружении у пациента неучтенных источников были выявлены закрытые микроисточники на основе ¹²⁵I.

Анализ данных, представленных в таблице 1, позволяет сделать вывод о том, что наиболее распространенной зарегистрированной нештатной ситуацией в период с 2015 по 2018 гг. (до введения ограничений на переезд границы) является выявление пассажира с превышением над фоном мощности амбиентного эквивалента дозы внешнего излучения на границе. С 2018 г. по настоящий момент 95% радиационных аварий связано с выявлением загрязненных радионуклидами отходов в бункере мусоровоза. Все остальные аварийные ситуации встречаются крайне редко: менее пяти случаев за весь период анализа данных. При расследовании причин радиационных аварии наиболее часто выявляются ¹³¹I и ^{99m}Tc. В последние годы зафиксированы радиационные аварии с ¹⁷⁷Lu. Остальные радионуклиды были выявлены эпизодически.

Подавляющее большинство (более 95%) зарегистрированных аварий, имеющих отношение к медицинским источникам ионизирующего излучения, слабо связаны непосредственно с проведением процедур лучевой диагностики или терапии. Фактически это аварии с техногенными источниками ионизирующего излучения.

В анкетировании приняло участие 25 отделений радионуклидной диагностики, в которых проводят сцинтиграфию и однофотонную эмиссионную томографию, 12 отделений позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ/КТ), 11 отделений изготовления-производства РФЛП (с отделениями контроля качества РФЛП) и 2 отделения радионуклидной терапии. Большинство обследованных отделений ядерной медицины работали с РФЛП на основе ^{99m}Tc (23 организации из 25); часть отделений радионуклидной диагностики – с препаратами на основе ¹²³I (7 организаций). Отделения позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) проводили работы с ¹⁸F (12 из 12 отделений); а также с ⁶⁸Ga (8 отделений), ¹¹C и ¹³N (6 и 5 отделений соответственно). Радионуклидную терапию проводили с препаратами ²²³Ra и ⁸⁹Sr (оба отделения).

Результаты ответов на вопросы по частоте выявляемости различных аварийных (нештатных) ситуаций представлены в таблице 2.

Таблица 1

Динамика изменения числа радиационных аварий и инцидентов, связанных с медицинскими источниками ионизирующего излучения, за период 2015–2022 гг.

[Table 1

Dynamics of number of radiation accidents associated with medical sources of ionizing exposure in 2015-2022]

Авария [Accident]	Год [Year]							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Выявлен пассажир с превышением мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения при прохождении контроля на границе [Identification of passengers with high ambient dose equivalent rate (ADER) during the border control]	22	11	19	13	15	5	0	1
Выявлен факт превышения МАЭД гамма-излучения в бункере мусоровоза [Identification of high ADER from waste truck hopper]	6	4	4	10	21	14	26	40
Выявлено превышение МАЭД гамма-излучения от бака с фекалиями в поезде [Identification of high ADER from waste tank in a train]	0	0	0	1	1	0	0	0
Выявлено загрязнение спецодежды медицинского персонала [Contamination of protective uniform of medical staff]	0	0	0	0	1	0	0	0
Обнаружены части гамма-терапевтического оборудования [Finding the gamma therapy equipment]	0	0	0	0	0	1	1	0
Обнаружение у пациента неучтенных источников (последствия брахитерапии) [Finding the unreported sources in patient (after brachytherapy)]	0	0	0	0	0	0	0	1
Итого [Total]	28	15	23	24	38	20	27	42

Результаты анкетирования по частоте выявляемости различных аварийных (нештатных) ситуаций в отделениях ядерной медицины

Results of questionnaire on the frequency of identification of various radiation events (accidents) in nuclear medicine departments]

Вид аварийной (нештатной) ситуации [Type of the radiation event (accident)]	Результат ответа на вопрос «Как часто вы сталкиваетесь со следующими ситуациями?» [How frequently do you encounter the following situations]					
	Никогда [Never encountered such situation]	Реже, чем 1 раз в год [Less than once per year]	Не реже, чем 1 раз в год [At least once per year]	Не реже, чем 1 раз в квартал [At least once per quarter]	Не реже, чем 1 раз в неделю [At least once per week]	Не применимо [Not applicable]
Нештатные ситуации, при которых возможно переоблучение персонала групп А и Б, а также медицинского персонала, относящегося к категории «население» [Radiation events when the overexposure to workers of nuclear medicine facilities is possible]						
Разлив РФЛП (загрязнение рабочей одежды или рабочих поверхностей радионуклидом) [Contamination of protective uniform and work surfaces by radiopharmaceuticals]	14 (53,8%)	7 (26,9%)	2 (7,7%)	1 (3,8%)	2 (7,7%)	–
Внештатное поступление (выброс) радионуклидов в воздух рабочей зоны при наработке радионуклидов или синтезе РФЛП [Emergency discharge of radionuclides into the air of the working area during radionuclide production or synthesis of radiopharmaceuticals]	15 (57,7%)	–	2 (7,7%)	–	–	9 (34,6%)
Загрязнение, связанное с работой генератора (включая повреждение генератора) [Contamination associated with generator operation (including generator damage)]	22 (84,6%)	1 (3,8%)	–	–	1 (3,8%)	2 (7,7%)
Проскок материнского радионуклида в пробе генератора [Slippage of the parent radionuclide in the generator sample]	10 (40%)	2 (8%)	1 (4%)	–	–	2 (8%) + 10 (40%) – не проводится контроль пробы на проскок [Probes are not sampled]
Утеря или обнаружение неучтенного закрытого источника ионизирующего излучения [Loss or finding of an unreported sealed source of ionizing radiation]	26 (100%)	–	–	–	–	–
Загрязнение оборудования или предметов биологическими жидкостями пациента, содержащими радионуклид, или попадания таких биологических жидкостей на персонал/пациентов [Contamination of equipment or items by patient fluids containing radionuclide or contact of workers/patients with such fluids]	13 (50%)	10 (38,5%)	2 (7,7%)	1 (3,8%)	–	–
Нештатные ситуации, при которых возможно переоблучение пациентов [Radiation events when the patient overexposure is possible]						
Диагностическую или терапевтическую процедуру случайно (по ошибке) проводят не тому пациенту [A diagnostic or therapeutic procedure is accidentally performed to the wrong patient]	18 (69,2%)	5 (19,2%)	3 (11,5%)	–	–	–
Пациенту случайно (по ошибке) вводят другой диагностический или терапевтический РФЛП [A patient is accidentally injected with another (wrong) diagnostic or therapeutic radiopharmaceutical]	15 (57,7%)	9 (34,6%)	2 (7,7%)	–	–	–

Вид аварийной (нештатной) ситуации [Type of the radiation event (accident)]	Результат ответа на вопрос «Как часто вы сталкиваетесь со следующими ситуациями?» [How frequently do you encounter the following situations]					
	Никогда [Never encountered such situation]	Реже, чем 1 раз в год [Less than once per year]	Не реже, чем 1 раз в год [At least once per year]	Не реже, чем 1 раз в квартал [At least once per quarter]	Не реже, чем 1 раз в неделю [At least once per week]	Не применимо [Not applicable]
Пациенту проводят диагностическое радионуклидное исследование без надлежащего обоснования (например, по желанию пациента, или без показаний к проведению) [Conducting radionuclide examination without proper referral]	13 (50%)	5 (19,2%)	2 (7,7%)	5 (19,2%)	1 (3,8%)	–
Экстравазальное введения РФЛП [Extravasation of radiopharmaceutical]	4 (15,4%)	6 (23,1%)	6 (23,1%)	7 (26,9%)	3 (11,5%)	–
Нарушение требований к качеству РФЛП [Violation of radiopharmaceutical quality requirements]	10 (38,5%)	6 (23,1%)	–	3 (11,5%)	–	7 (26,9%)
Снижение качества исследования (диагностического изображения) по причине некачественного РФЛП [Decrease of the quality of the study (diagnostic image) due to poor-quality radiopharmaceuticals]	11 (42,3%)	9 (34,6%)	3 (11,5%)	3 (11,5%)	–	–
Ошибки при планировании радионуклидной терапии, которые привели к существенному недо- или переоблучению пациента [Planning errors in radionuclide therapy that led to significant under- or overexposure of the patient]	3 (11,5%)	–	–	–	–	23 (88,5%)
В ходе проведения диагностического радионуклидного исследования или терапевтической процедуры была выявлена беременность пациентки после введения РФЛП [Identification that the patient is pregnant after (or during) the radiopharmaceutical injection]	26 (100%)	–	–	–	–	–
Нештатные ситуации, при которых возможно переоблучение населения после выписки пациента с введенным терапевтическим РФЛП [Radiation events when the overexposure to public after release of the patient with therapeutic radiopharmaceutical is possible]						
Сброс биологических жидкостей пациента, содержащих радионуклид, в общую систему канализации при проведении радионуклидной терапии [Discharge of patient fluids containing radionuclide into the general sewage system during radionuclide treatment]	4 (15%)	–	–	–	–	21 (85%)
Выписка пациентов после радионуклидной терапии проводилась без дозиметрического контроля пациента или оценки остаточной активности радионуклида в теле пациента [Patient release after radionuclide therapy without dosimetric monitoring of the patient or assessment of residual radionuclide activity]	3 (11,5%)	–	–	–	–	23 (88,5%)
Выписка пациентов после радионуклидной терапии проводилась раньше достижения установленных радиологических критериев выписки после радионуклидной терапии [Patient release after radionuclide therapy before reaching the established radiological criteria]	3 (11,5%)	–	–	–	–	23 (88,5%)

По данным, представленным в таблице 2, возможно сделать следующие выводы:

- Наиболее распространёнными нештатными ситуациями, связанными с потенциальным переоблучением персонала, являются ситуации с разливом РФЛП или загрязнением оборудования или предметов биологическими жидкостями пациента. О возникновении таких ситуаций в своей практике ответило более 40% респондентов. Остальные нештатные ситуации, относящиеся к персоналу, в результатах анкетирования практически не встречаются;

- Все нештатные ситуации, связанные с переоблучением пациентов или экстравазальным введением РФЛП, распространены в значительной части организаций (30–50%), принявших участие в анкетировании;

- Также достаточно распространёнными являются нештатные ситуации, связанные с низким качеством диагностических или терапевтических РФЛП и, как следствие, со снижением качества полученной диагностической информации;

- Ситуаций, связанных с облучением или переоблучением беременных пациентов по результатам сбора данных не выявлено. Это объясняется тем, что диагностические и терапевтические радионуклидные исследования как правило выполняются после проведения других диагностических исследований; статус беременности к моменту их проведения уже известен;

- Нештатные ситуации, связанные с потенциальным переоблучением населения вследствие нарушений при выписке пациентов после проведения радионуклидной терапии, отсутствуют, что объясняется малым количеством отделений радионуклидной терапии, принявших участие в анкетировании, которые также не использовали гамма-излучающие радионуклиды.

Сравнение официальных данных по радиационным авариям и результатов анкетирования свидетельствует о наличии фундаментальных различий между реально происходящими и регистрируемыми радиационными авариями. Данные различия обусловлены тем, что в базу данных аварий Роспотребнадзора попадают нештатные ситуации, выявленные за пределами медицинской организации внешними наблюдателями. Все нештатные ситуации, происходящие в медицинских организациях (в отделениях ядерной медицины, в частности), по-видимому, не регистрируются, или при их регистрации отсутствует должное реагирование (оповещение органов Роспотребнадзора). Косвенным свидетельством этому является всего 1 случай официально зарегистрированного загрязнения спецодежды персонала радионуклидами, в то время как по результатам анкетирования более чем в 10% медицинских организаций такие случаи происходят не реже 1 раза в год (таблица 2). Все нештатные ситуации, представленные в таблице 2, в соответствии с действующими нормативно-методическими документами Роспотребнадзора относятся к радиационным авариям [13], и, как следствие, при их наступлении администрации медицинской организации

необходимо информировать Роспотребнадзор в соответствии с существующим регламентом⁷.

Результаты, представленные в таблице 2, свидетельствуют о том, что в отделениях ядерной медицины может возникать весь спектр аварийных (нештатных), описанных в предыдущих работах авторов [13,14].

Следует отметить, что в отделениях радионуклидной терапии 100% респондентов ответили об отсутствии нештатных ситуаций, связанных с выпиской пациентов и проведением дозиметрического контроля при выписке. Следует отметить, что в настоящий момент отсутствуют специфические критерии выписки пациентов, прошедших терапию препаратами ¹⁷⁷Lu, ²²³Ra, ⁸⁹Sr, ²⁵⁵Ac⁸. Таким образом, персонал отделений радионуклидной терапии скорее всего просто игнорирует специфику выписки пациентов после терапии альфа- и бета-излучателями. Возникающие при этом проблема просто не идентифицируются как аварийные (нештатные) ситуации.

Отдельной проблемой остается отнесение выявления пациентов с введенным терапевтическим радионуклидом (с превышением МАЭД внешнего облучения над фоном) на пунктах дозиметрического контроля к радиационным авариям. При выявлении таких пациентов целесообразно сравнивать измеренную МАЭД с результатами дозиметрического контроля пациента при выписке, указанными в медицинской документации (или критериями выписки пациентов), и относить такую ситуацию к радиационной аварии только при превышении МАЭД установленных критериев выписки.

Также следует отметить высокую частоту экстравазального введения РФЛП. Данная нештатная ситуация ассоциирована с дополнительным поражением тканей, в которые был введен препарат, за счёт внешнего облучения от РФЛП. Введение терапевтических РФЛП практически всегда будет приводить к некрозу тканей [10–12]. Профилактике возникновения таких ситуаций должно уделяться максимальное внимание.

Заключение

Результаты данной работы ещё раз подчёркивают необходимость изменения подходов к идентификации, классификации и реагированию на нештатные (аварийные) ситуации при медицинском облучении.

Для успешного решения обозначенных проблем необходимо:

- Разработать и внедрить в отечественные нормативно-методические документы классификацию аварийных (нештатных) ситуаций при проведении процедур ядерной медицины. Данное решение позволит персоналу отделений ядерной медицины как минимум иметь возможность идентифицировать аварийную (нештатную) ситуацию;

- Ввести дифференцированный подход к реагированию на различные аварийные (нештатные) ситуации. Ряд ситуаций может не приводить к переоблучению персонала и/или населения и, как следствие, не требовать оповещения органов Роспотребнадзора. Все корректирующие меры могут

⁷ Методические рекомендации «Санитарно-гигиенические требования к мероприятиям по ликвидации последствий радиационной аварии» (МР 2.6.1.0050-11): утв. и введены в действие с 25.12.2011 г. [Methodical recommendations “Sanitary and hygienic requirements for measures to eliminate the consequences of a radiation accident” (MR 2.6.1.0050-11): approved on 25.12.2011 (In Russ.)]

⁸ В соответствии с п. 3.4.3 СанПиН 2.6.1.2368-08 мощность дозы фотонного излучения на расстоянии 1 м от пациента не должна превышать 3 мкЗв/ч.

быть приняты и реализованы на уровне медицинской организации, или даже на уровне отделения ядерной медицины. При этом такие ситуации все равно необходимо идентифицировать и регистрировать;

- Разработать численные критерии для оценки факта ошибочного введения пациенту большей или меньшей активности радионуклида в РФП, что привело к некачественному исследованию или неэффективной терапевтической процедуре;

- Разработать и внедрить в практику инструкцию по действиям в случае наступления различных аварийных (нештатных) ситуаций, направленную в первую очередь на методику ретроспективной оценки доз облучения пострадавших лиц.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

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

Рыжов С.А. – разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Петрякова А.В. – поиск и анализ литературы, описание материалов и методов, перевод.

Библин А.М. – анализ результатов.

Горский Г.А. – разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Вишнякова Н.М. – анализ результатов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. Martin C.J., Vassileva J., Vano E. et al. Unintended and accidental medical radiation exposures in radiology: guidelines on investigation and prevention // *Journal of Radiological Protection*. 2017. Vol. 37, No 4. P. 883. DOI: 10.1088/1361-6498/aa881e.
2. Marengo M., Martin C.J., Rubow S. et al. Radiation Safety and Accidental Radiation Exposures in Nuclear Medicine // *Seminars in Nuclear Medicine*. 2022. Vol. 52, No 2. P. 94-113 DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2021.11.006.

3. Jaschke W, Bartal G, Martin CJ, Vano E. Unintended and Accidental Exposures, Significant Dose Events and Trigger Levels in Interventional Radiology // *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2020. Vol. 43. P. 1114–1121. DOI: 10.1007/s00270-020-02517-2.
4. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna, 2014. 518 p.
5. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA: Vienna, 2018. 340 p.
6. International Atomic Energy Agency. Quality Assurance for PET and PET/CT Systems. IAEA Human Health Series No. 1. IAEA: Vienna, 2009. 145 p.
7. International Atomic Energy Agency. Quality Assurance for SPECT Systems. IAEA Human Health Series No. 6. IAEA: Vienna, 2009. 249 p.
8. Чипига Л.А., Ладанова Е.Р., Водоватов А.В. и др. Тенденции развития ядерной медицины в Российской Федерации за 2015–2020 гг. // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 4. С. 122-133. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133.
9. Чипига Л.А., Звонова И.А., Рыжкова Д.В. и др. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 4. С. 31-43. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43.
10. van der Pol J., Vöö S., Bucnerius J., Mottaghy F.M. Consequences of radiopharmaceutical extravasation and therapeutic interventions: a systematic review // *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2017. Vol. 44, No 7. P. 1234-1243. DOI: 10.1007/s00259-017-3675-7.
11. Morgan T.L. Extravasation of radiopharmaceuticals: Why report? *Frontiers in Nuclear Medicine*. 2023. Vol. 3. P. 1148177. DOI: 10.3389/fnume.2023.1148177.
12. Osborne D., Kiser J.W., Knowland J. et al. Patient-specific Extravasation Dosimetry Using Uptake Probe Measurements // *Health Physics*. 2021. Vol. 120, No 3. P. 339-343. DOI: 10.1097/HP.0000000000001375.
13. Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А. и др. Радиационные аварии в лучевой и радионуклидной диагностике и терапии: сравнение российских и международных подходов к терминологии и классификации // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 1. С. 97-110. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110.
14. Vodovatov A.V., Ryzhov S.A., Chipiga L.A. and др. Perspective approaches to classification of radiation accidents in radiology on the example of computed tomography. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2021. No. 2356(1).
15. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English / edited by M. F. Kiselev, N. K. Shandala. Moscow: «Alana», 2009. 312 p. (In Russian).
16. Громов А.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Тутельян О.Е. Сравнительный анализ информации о радиационных авариях в Российской Федерации в 2010–2022 гг. // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 4. С. 122-133. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-122-133.

Поступила: 21.07.2024

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

ORCID: 0000-0002-5191-7535

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

ORCID: 0000-0001-9153-3061

Рыжов Сергей Анатольевич – вице-президент Ассоциации медицинских физиков России; начальник отдела радиационной безопасности и медицинской физики Национального медицинского исследовательского центра детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева; научный сотрудник Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-0640-7368

Петрякова 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 СПб ГБУЗ «Городская больница № 40», Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-2663-9091

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

Горский Григорий Анатольевич – кандидат медицинских наук, заместитель директора по инновационной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева 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

Вишнякова Надежда Михайловна – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Петрякова А.В., Библин А.М., Горский Г.А., Вишнякова Н.М. Анализ распространенности аварийных ситуаций в ядерной медицине в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 93–102. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-93-102

Analysis of the radiation accidents prevalence in nuclear medicine in the Russian Federation

Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Sergey A. Ryzhov^{5,6,7}, Anastasia V. Petryakova^{1,8}, Artem M. Biblin¹, Grigory A. Gorsky^{1,9}, Nadezhda M. Vishnyakova¹

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

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

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

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

⁵ Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

⁶ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁷ Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

⁸ The City Hospital No 40 of the Kurortny District, Saint Petersburg, Russia

⁹ I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint Petersburg, Russia

Radiation events (accidents) appearance is an integral part of the use of ionizing radiation sources in medicine in general and nuclear medicine in particular. To minimize the negative impact on patients, workers, and public due to such events, it is necessary to have reliable information about real prevalence of

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

the radiation events (accidents). The current work presents the analysis of the radiation accidents with medical ionizing radiation sources registered in the “Data bank of radiation accidents and incidents” of the Rospotrebnadzor Information and Analytical Centre for Radiation Safety and the results of workers questionnaires conducted in 25 nuclear medicine departments (about 30% of all nuclear medicine departments in the Russian Federation). The results of the analysis showed that the most common registered radiation accidents in the “Data bank of radiation accidents and incidents” are identification of passengers with high external dose rate as well as identification of waste contaminated by medical radionuclides. The results of the questionnaire showed that the most common radiation accidents (events) in nuclear medicine are contamination of work clothes or work surfaces with radionuclides, or patient fluids containing radionuclides; conducting examination without proper referral; extravasation of radiopharmaceutical. Existing systems of identification and registration of radiation accidents do not allow to identify radiation events (accidents) specific to nuclear medicine. The further research aimed at developing a classification of radiation events (accidents) in medicine and methods for responding to such events are feasible.

Key words: radiation accident, radiation incident, medical exposure, patients, workers.

Authors' personal contribution

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

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

Ryzhov S.A. - development of the study design, analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Petryakova A.V. - search and analysis of literature, description of materials and methods, translation.

Biblin A.M. - analysis of the results.

Gorsky G.A. - development of the study design, analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Vishnyakova N.M. - analysis of the results.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

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

References

- Martin CJ, Vassileva J, Vano E, Mahesh M, Ebdon-Jackson S, Ng KH et al. Unintended and accidental medical radiation exposures in radiology: guidelines on investigation and prevention. *Journal of Radiological Protection*. 2017;37(4): 883. DOI: 10.1088/1361-6498/aa881e.
- Marengo M, Martin CJ, Rubow S, Sera T, Amador Z, Torres L. Radiation Safety and Accidental Radiation Exposures in Nuclear Medicine. *Seminars in Nuclear Medicine*. 2022;52(2): 94-113. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2021.11.006.
- Jaschke W, Bartal G, Martin CJ, Vano E. Unintended and Accidental Exposures, Significant Dose Events and Trigger Levels in Interventional Radiology. *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2020;43: 1114-1121. DOI: 10.1007/s00270-020-02517-2.
- IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna; 2014. 518 p.
- Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA: Vienna; 2018. 340 p.
- International Atomic Energy Agency. Quality Assurance for PET and PET/CT Systems. IAEA Human Health Series No. 1. IAEA: Vienna; 2009. 145 p.
- International Atomic Energy Agency. Quality Assurance for SPECT Systems. IAEA Human Health Series No. 6. IAEA: Vienna; 2009. 249 p.
- Chipiga LA, Ladanova ER, Vodovатов AV, Zvonova IA, Moununov AA, Naurzbaeva LT, et al. Trends in the development of nuclear medicine in the Russian Federation for 2015–2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 122-133. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133.
- Chipiga LA, Zvonova IA, Ryzhkova DV, Menkov MA, Dolgushin MB. Levels Of Patients Exposure and a Potential for Optimization of the PET Diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4):31-43. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43.
- van der Pol J, Vöö S, Bucerius J, Mottaghy FM. Consequences of radiopharmaceutical extravasation and therapeutic interventions: a systematic review. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2017;44(7): 1234-1243. DOI: 10.1007/s00259-017-3675-7.
- Morgan TL. Extravasation of radiopharmaceuticals: Why report? *Frontiers in Nuclear Medicine*. 2023;3: 1148177. DOI: 10.3389/fnume.2023.1148177.
- Osborne D, Kiser JW, Knowland J, Townsend D, Fisher DR. Patient-specific Extravasation Dosimetry Using Uptake Probe Measurements. *Health Physics*. 2021;120(3): 339-343. DOI: 10.1097/HP.0000000000001375.
- Vodovатов AV, Chipiga LA, Ryzhov SA, Petryakova AV, Biblin AM, Gorsky GA. Radiation accidents in X-ray and radionuclide diagnostics and therapy: comparison of Russian and international approaches to the terminology and classification. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 97-110. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110]
- Vodovатов AV, Ryzhov SA, Chipiga LA, Biblin AM, Druzhinina PS. Perspective approaches to classification of radiation accidents in radiology on the example of computed tomography. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing; 2021. No. 2356(1).
- ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English / edited by MF Kiselev, NK Shandala. Moscow: «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian).
- Gromov AV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Tutelyan OE. Comparative analysis of information on radiation accidents in the Russian Federation in 2010–2022. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 122-133. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-122-133].

Received: July 21, 2024

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 (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-5191-7535

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

ORCID: 0000-0001-9153-3061

Sergey A. Ryzhov – vice president, Association of Medical Physicists in Russia; research fellow, Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies; head of the radiation safety and medical physics department, Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-0640-7368

Anastasia V. Petryakova – 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

ORCID: 0000-0003-2663-9091

Artem M. Biblin – senior research fellow, head of Information-analytical center, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-3139-2479

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

Nadezhda M. Vishnyakova – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

For citation: Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Petryakova A.V., Biblin A.M., Gorsky G.A., Vishnyakova N.M. Analysis of the radiation accidents prevalence in nuclear medicine in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3, P. 93-102. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-93-102

Референтные диагностические уровни при проведении рентгенографических исследований в г. Москве

Ю.В. Дружинина^{1,2}, З.А. Лантух¹, К.В. Толкачев¹, И.В. Солдатов¹, М.П. Шатёнок¹,
А.В. Водоватов⁴, П.С. Дружинина⁴, И.Г. Шацкий⁴, С.А. Рыжов^{1,3}

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

² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

³ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дмитрия Рогачева Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

⁴ 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

Одним из эффективных инструментов оптимизации доз облучения пациентов при лучевой диагностике являются референтные диагностические уровни. В отношении рентгенографических исследований установление референтных диагностических уровней хотя и является общепринятой зарубежной практикой, однако у персонала отечественных отделений лучевой диагностики отсутствует понимание процесса разработки и использования данного инструмента. В данной статье показан опыт формирования региональных референтных диагностических уровней на основе данных измерений аккредитованной испытательной лаборатории «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы». На базе работы 216 рентгеновских цифровых аппаратов для 8 наиболее распространенных видов исследований были разработаны референтные диагностические уровни для рентгенографии г. Москвы. Результирующие значения, установленные в величине произведение дозы на площадь (сГр·см²) и эффективной дозе (мЗв), были сопоставлены с ранее определенными локальными уровнями г. Рязани и национальными референтными диагностическими уровнями различных стран. Анализ показал преемственность величин, некоторые виды исследований были представлены к оптимизации. Разработанные референтные диагностические уровни являются показателями качества работы отделений лучевой диагностики и будут применены для оптимизации дозы облучения пациента при диагностических исследованиях г. Москвы.

Ключевые слова: рентгенологические исследования, пациенты, эффективная доза, референтный диагностический уровень, стандартная доза, рентгенодиагностический аппарат.

Введение

В настоящее время действует ряд нормативно - методических документов, в которых приводятся рекомендации и/или методики по определению доз облучения пациента^{1,2} [1-3]. За последние десятилетия проделана большая работа по оптимизации радиационной защиты пациентов при рентгенодиагностических исследованиях [4-8]. Созданы и аккредитованы испытательные лаборатории и лабораторные центры, налажена их работа по контролю эксплуатационных

параметров рентгеновских аппаратов, оценке доз облучения пациентов.

Одним из направлений по оптимизации медицинского облучения является внедрение в практику референтных диагностических уровней [5, 8, 9 – 14]. В мире, в том числе в нашей стране, разработаны и используются методики по установке и применению на практике, полученных значений референтных диагностических уровней^{1,2} [15]. РДУ представляет собой ориентир для оптимизации медицинского облучения пациентов в медицин-

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.)]

²МУ 2.6.1.3584-19. Изменение в МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. М.: Роспотребнадзор, 2019. 32 с. [Methodical guidelines MU 2.6.1.3584-19. Change in MU 2.6.1.2944-11. Control of the patient effective doses from X-ray diagnostic examinations. Moscow: Rospotrebnadzor; 2019. 32 p. (In Russ.)]

Дружинина Юлия Владимировна

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

Адрес для переписки: 127051, Россия, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1; E-mail: DruzhininaYV2@zdrav.mos.ru

ской организации (МО) региона или страны^{3,4} [5, 8].

Референтные диагностические уровни (РДУ) – установленные значения выбранной дозиметрической величины, численно равное 75-му перцентилю распределения рентгеновских кабинетов для конкретного вида исследований. Распределение по данной дозиметрической величине строится для рентгеновских кабинетов отдельной страны или региона. РДУ используют для регулирования средних уровней облучения пациентов при проведении выбранных рентгенодиагностических исследований на конкретном рентгеновском аппарате, но не применяют к отдельным пациентам. Для обеспечения совместимости с действующими в Российской Федерации системами контроля и учета доз пациентов рекомендуется в дополнение к дозиметрическим величинам устанавливать РДУ в значениях эффективной дозы (ЭД)³. РДУ устанавливают и используют применительно к наиболее распространенным исследованиям, проводимым с использованием типовых протоколов. Совокупность аппаратов для лучевой или радионуклидной диагностики для установления региональных РДУ должна быть представительной в отношении географии их распределения, основных моделей и протоколов проведения исследований, используемых в регионе^{3,4} [5].

В Российской Федерации в рамках контроля за радиационной безопасностью при выполнении рентгенодиагностических исследований проводится контроль эксплуатационных параметров рентгеновского оборудования, также на основе измерений проводятся расчеты таблиц эффективных доз^{1,2} для тех типов процедур, которые осуществляются на конкретном рентгеновском аппарате общего назначения. Полученные данные анализируются для принятия мер по оптимизации медицинского облучения.

Модернизация парка оборудования, оптимизация протоколов исследования влияет на дозы облучения пациентов. Применение РДУ позволяет отслеживать и контролировать данные изменения [9, 16]. Анализ применения РДУ во Франции с 2004 г. свидетельствует о постоянном снижении доз облучения пациентов при проведении рентгенографии и компьютерной томографии. Каждые 2 года (рентгенография) или 3 года (компьютерная томография), уровни облучения пациентов снижались в среднем примерно на 15% [9]. Подобные результаты подтверждают необходимость периодического обновления национальных РДУ для обеспечения непрерывности процессов оптимизации.

Цель исследования – определение численных значений региональных РДУ в г. Москве для наиболее распространенных рентгенографических процедур для взрослых пациентов на стационарных цифровых рентгенодиагностических аппаратах общего назначения.

Материалы и методы

Определение РДУ проводилось с использованием утвержденных методик МР № 121 и МР 2.6.1.0296-22^{3, 4}. Основными объектами исследования являлись цифровые рентгеновские аппараты общего назначения, наиболее часто встречающиеся модели, из применяемых в медицинских организациях г. Москвы. В выборку исследования вошли 216 рентгеновских цифровых аппаратов общего назначения, установленных в 132 медицинских организациях (стационарах и поликлиниках) города Москвы различной подчиненности, как частных, так и входящих в Департамент Здравоохранения г. Москвы. Доля исследуемых рентгеновских аппаратов составила 35% от общего парка рентгенодиагностических аппаратов г. Москвы, что соответствует рекомендациям МР № 121³.

В ходе данной работы определялись значения РДУ для процедур облучения взрослых пациентов на стационарных цифровых рентгенодиагностических аппаратах общего назначения для наиболее востребованных исследований в каждой проекции (боковая (Б), задне-передняя (ЗП), передне-задняя (ПЗ)), которые применялись при проведении конкретного рентгеновского исследования⁴.

Выезды на объекты и измерения проводились в течение 2-х лет в период с 2021-2022 гг. В соответствии с МР 2.6.1.0296-22⁴ были собраны данные о режимах проведения исследований, такие как: ток, напряжение, фильтрация, выдержка, размер поля, фокусное расстояние. Для каждого режима собирались данные о параметрах проведения рентгенологического исследования не менее, чем для 15 пациентов³ из архива медицинской организации, при помощи опроса рентгенолаборантов, а также выгрузки данных цифровой базы программного обеспечения аппарата. Прямые измерения радиационного выхода для каждого рентгеновского аппарата проводились в период 2021-2022 гг. Измерения радиационного выхода осуществлялись в соответствии с МР № 0100/12883-07-34⁵ ГОСТ Р МЭК 61223-1-2001⁶: с использованием универсального дозиметра для контроля характеристик рентгеновских аппаратов «RaySafe Xi» (Швеция).

На основании методических рекомендаций № 121³ и 2.6.1.0296-22⁴ РДУ определяются в единицах эффективной дозы и в измеряемых дозовых характеристиках. В рамках данной работы в качестве измеряемой дозовой характеристики было использовано значение произведение дозы (воздушной кермы) на площадь (ПДП) $cГр \cdot см^2$ [14].

Вычисление ПДП проводилось на основании МР 2.6.1.0296-22⁴ по формуле:

³ Методические рекомендации № 121. Применение референтных диагностических уровней для взрослых пациентов в лучевой диагностике. М.: ДЗМ. 2020. 35 с. [Methodological recommendations No. 121. Application of diagnostic reference levels to adult patients in diagnostic radiology. Moscow, DZM, 2020, 35 p. (In Russ.)]

⁴ МР 2.6.1.0296-22 «Оптимизация радиационной защиты пациентов в лучевой диагностике посредством применения референтных диагностических уровней» – М.: Роспотребнадзор. 2022. 40 с. [Methodological recommendations MR 2.6.1.0296-22 Optimization of radiation protection for patients in diagnostic radiology by using diagnostic reference levels. Moscow, Rosпотребнадзор, 2022. 40 p. (In Russ.)]

⁵ Методические рекомендации № 0100/12883-07-34. Определение радиационного выхода рентгеновских излучателей медицинских рентгенодиагностических аппаратов». М.: Роспотребнадзор, 2008. 25 с. [Methodological recommendations No. 0100/12883-07-34. Determination of the radiation output of X-ray emitters of medical X-ray diagnostic devices. Moscow: Rosпотребнадзор, 2008. 25 p. (In Russ.)]

⁶ ГОСТ Р МЭК 61223-1-2001 «Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновских аппаратов в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики». [GOST R IEC 61223-1-2001 Evaluation and control of operational parameters of X-ray machines in radiology departments (rooms). (In Russ.)]

$$\text{ПДП} = \frac{\text{ВД} \times l \times h}{10}, \text{сГр} \cdot \text{см}^2 \quad (1)$$

где: ВД – входная поверхностная доза в воздухе, мГр; l – длина поля облучения на теле пациента, см; h – ширина поля облучения на теле пациента, см.

В свою очередь входная доза вычислялась на основании МР 2.6.1.0296-22⁴ по формуле:

$$\text{ВД} = \frac{k \times R \times Q \times 10^4}{60 \times (\text{РИП} - l)^2}, \text{мГр} \quad (2)$$

где: k – коэффициент обратного рассеяния, принятый равным 1,4 вне зависимости от спектра рентгеновского излучения в диапазоне напряжений на трубке от 50 до 150 кВ, отн. ед; R – радиационный выход рентгеновского аппарата, мГр·м²/(мА·мин); Q – произведение тока на время экспозиции, мАс; РИП – расстояние от фокуса трубки до приемника рентгеновского изображения, см; l – толщина пациента, принимаемая равной 20 см в передне-задней проекции и 40 см в боковой проекции.

Значение эффективной дозы облучения пациента данного возраста при проведении рентгенологического исследования определялось с помощью выражения^{1,2}:

$$E = \text{ПДП} \times K_d \times 10^{-3}, \text{мкЗв} \quad (3)$$

где: ПДП – значение произведения дозы на площадь, сГр·см², рассчитанная по формуле (1); K_d – коэффициент перехода от значения ПДП к эффективной дозе облучения взрослого пациента с учетом вида проведенного рентгенологического исследования, проекции, размеров поля, фокусного расстояния и анодного напряжения на рентгеновской трубке, мкЗв/(сГр·см²); 10⁻³ – коэффициент перехода от мкЗв к мЗв.

Коэффициент перехода K_d от значения ПДП к эффективной дозе облучения пациента данного возраста с учетом вида проведенного рентгенологического исследования рассчитывался для каждого конкретного случая измерения радиационного выхода в зависимости от проекции, размеров поля, фокусного расстояния, анодного напряжения, фильтрации, тока на трубке и времени исследования при помощи программного обеспечения РСХМС 2.0.

Стандартную дозу (СД) для выбранных рентгенографических процедур определяли, как среднюю дозу для выборки взрослых пациентов обоего пола с массой тела 70±20 кг при проведении рентгенографии в типовом режиме работы рентгеновского аппарата с типовым протоколом его выполнения³.

Значение РДУ определялись равным 75-му перцентилю распределения стандартных доз для выбранных рентгенографических процедур в различных медицинских кабинетах³ [14].

Статистическая обработка данных проводилась в Microsoft Excel, с визуальным представлением в виде гистограмм «ящик с усами». В соответствии с ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017⁷ был рассчитан межквартильный размах (IQR), который является разницей между значениями тре-

тьего (Q₃) и первого (Q₁) квартиля. Нижняя граница представляется собой разницу между Q₁ и 1,5·IQR, верхняя граница – сумма Q₃ и 1,5·IQR, на рисунках 1-4 представлены в виде «усов» гистограммы «ящик с усами». Выбросами являются все значения, которые оказались за пределами верхней и нижней границ, на рисунках 1-4 представлены в виде точек.

Результаты

Результаты определения численных значений РДУ в величине эффективной дозы и ПДП для выбранных рентгенографических исследований, а также количество значений стандартных эффективных доз (СД), применяемых для установки РДУ представлены в таблице 1. На основании МР 2.6.1.0296-22⁴ РДУ устанавливалось для соответствующих проекций, при которых делались снимки при проведении выбранного рентгенографического исследования: задне-передняя (ЗП), передне-задняя (ПЗ) и боковая (Б). Распределения значений произведения дозы (воздушной кермы) на площадь представлены на рисунках 1-4. * – крестик на диаграмме «ящик с усами» отражает среднее значение, горизонтальная линия в средней области прямоугольника – медианное значение.

Обсуждение

РДУ не являются нормативом, а используются как референтное значение в целях внутреннего контроля качества проведения процедур. Превышение РДУ не означает автоматически, что процедуры проводят некачественно, так как оно может быть обусловлено техническими особенностями используемой аппаратуры или протокола проведения процедуры. Первоочередным этапом процесса оптимизации является оценка текущей ситуации с медицинским облучением для выбранных рентгенологических процедур и ее анализ с целью установления границы между хорошей и плохой практиками проведения исследований [14]. Выявленные случаи аномально высоких или аномально низких значений стандартных доз по отношению к РДУ, в том числе при помощи рисунков 1- 4, позволяют определить те рентгеновские аппараты, на которые стоит обратить внимание. Анализ качества работы рентгеновского аппарата, медицинского персонала рентгеновского кабинета необходим для выявления причин, как аномально высоких, так и аномально низких значений эффективных доз и при необходимости проведения оптимизации протоколов исследования. Стоит отметить, что для таких исследований как ПОП, таз-крестец, кишечник_ЗП максимальные и минимальные значения средних доз отличались более чем в 10 раз, что говорит о существенном отличии в практике проведения исследований и разнородности применяемых в медицинских организациях технологий.

В таблице 2 представлено сравнение РДУ г. Москвы, определенных в значениях эффективных доз, с данными, полученными для Рязанской области в 2019 г и со значениями (Q₃) предоставленными Научно-исследовательским институтом радиационной гигиены в 2015-2016 гг. [4, 8].

⁷ ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017 «Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов». [GOST R ISO 16269-4-2017, Statistical interpretation of data — Part 4: Detection and treatment of outliers, IDT]. (In Russ.)]

Полученные результаты значений РДУ в величине эффективной дозы и ПДП для выбранных рентгенографических исследований и количество значений стандартных эффективных доз, применяемых для установки РДУ

[Table 1

Values of the DRLs in the effective dose and DAP for selected radiographic studies and the number of standard effective dose values used to set the DRLs]

Анатомическая область с проекцией [Anatomical area with an indication of the projection]	Количество СД, попавших в выборку, шт. [Quantity of SD included in the sample, pcs]	РДУ Еэфф (Q3), мЗв [DRL (Q3) Eff, mSv]	Медиана (Q2) Еэфф, мЗв [Mean (Q2) Eff, mSv]	РДУ (Q3) в ПДП, сГр·см ² [DRL (Q3) in DAP, cGy·cm ²]	Медиана (Q2) в ПДП, сГр·см ² [Mean (Q2) in DAP, cGy·cm ²]
Органы грудной клетки_ЗП [Chest_PA]	216	0,08	0,04	85	45
Органы грудной клетки_Б [Chest_LAT]	205	0,09	0,04	190	80
Грудной отдел позвоночника_ПЗ [Thoracic spine_AP]	216	0,17	0,11	180	120
Грудной отдел позвоночника_Б [Thoracic spine_LAT]	216	0,15	0,09	450	260
Поясничный отдел позвоночника_ПЗ [Lumbar_AP]	216	0,37	0,26	330	240
Поясничный отдел позвоночника_Б [Lumbar_LAT]	216	0,23	0,20	900	700
Таз, крестец_ПЗ [Pelvis_AP]	184	0,44	0,25	480	280
Таз, крестец_Б [Pelvis_LAT]	141	0,29	0,15	900	520
Тазобедр.суставы_ПЗ [Hip joint_AP]	193	0,29	0,13	200	90
Шейный отдел позвоночника_ЗП [Cervical_PA]	205	0,03	0,02	110	75
Шейный отдел позвоночника_Б [Cervical_LAT]	204	0,06	0,04	280	150
Череп_ПЗ [Scull_AP]	194	0,06	0,04	180	110
Череп_Б [Scull_LAT]	216	0,02	0,01	220	140
Бедренная кость_ПЗ [Femur_PA]	167	0,07	0,05	60	45
Бедренная кость_Б [Femur_LAT]	103	0,01	0,01	110	55
Бедро_ПЗ [Hip_AP]	135	0,03	0,02	120	70
Желудок_ЗП [Stomach_PA]	24	0,13	0,088	170	120
Желудок_Б [Stomach_LAT]	32	0,08	0,063	280	200
Кишечник_ЗП [Intestines_PA]	24	0,38	0,282	400	300
Кишечник_Б [Intestines_LAT]	26	0,26	0,217	700	570
Брюшная полость_ЗП [Abdomen_PA]	11	0,25	0,214	650	550
Брюшная полость_Б [Abdomen_LAT]	9	0,25	0,167	310	280
Плечевой сустав_ПЗ [Shoulder joint_AP]	199	0,02	0,011	51	37
Плечо, ключица_ПЗ [Shoulder, collarbone_AP]	172	0,029	0,017	74	44
Плечо_ПЗ [Shoulder_AP]	63	0,001	0,001	61	51

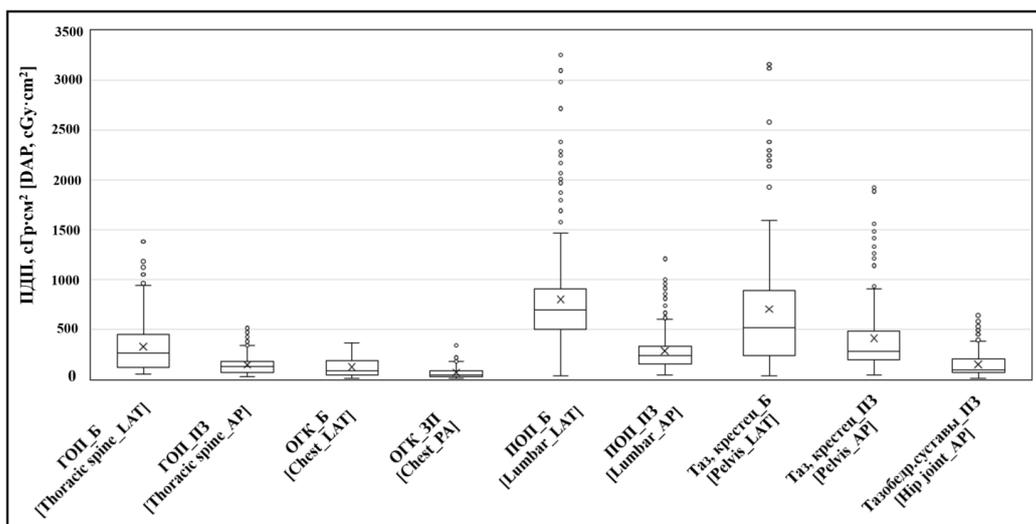


Рис. 1. Визуализация значений ПДП, применяемых для установки РДУ для органов грудной клетки (ОГК), таза, крестца, грудного отдела позвоночника (ГОП) и поясничного отдела позвоночника (ПОП)
[Fig. 1. Visualization of the DAP values used to determine DRL for organs of chest, pelvis, sacrum, thoracic and lumbar spine]

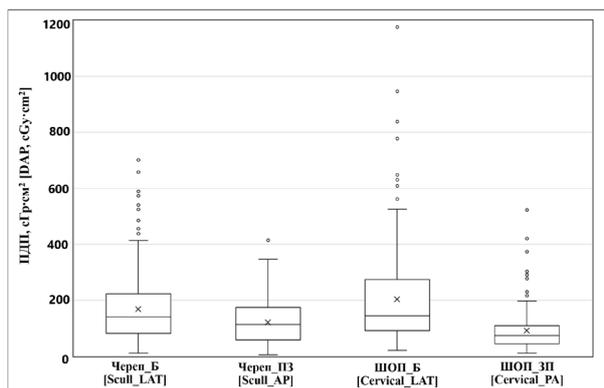


Рис. 2. Распределение значений ПДП, применяемых для установки РДУ анатомической области череп и шейного отдела позвоночника (ШОП)
[Fig. 2. Distribution of the DAP values used to determine DRL for the anatomical areas of skull and cervical spine]

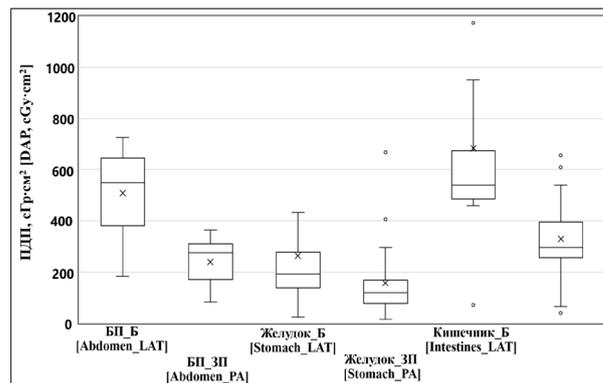


Рис. 3. Распределение значений ПДП, применяемых для установки РДУ анатомической области «органы брюшной полости»
[Fig. 3. Distribution of the DAP values used to determine DRL for the anatomical area of abdominal organs]

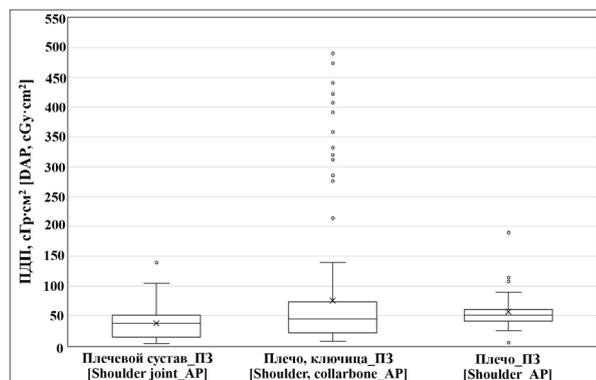


Рис. 4. Распределение значений ПДП, применяемых для установки РДУ анатомической области «плечо, ключица»
[Fig. 4. Distribution of the DAP values used to determine DRL for the anatomical area of shoulder and clavicle]

Таблица 2

Сравнение РДУ (Еэфф, мЗв) г. Москвы с РДУ и Q3 других регионов

[Table 2

Comparison of the DRL (Eeff, mSv) for Moscow with DRL and Q3 for other regions]

Область исследования [Study area]	Проекция [Projection]	РДУ _{Еэфф} , Москва, мЗв [DRL _{Еэфф} , mSv]	РДУ _{Еэфф} , Рязанская область, мЗв [8] [DRL _{Еэфф} , Ryazan region, mSv [8]]	Q3 _{Еэфф} , мЗв 2015-2016 г. [4] [Q3 _{Еэфф} 2015-2016 [4]]
Органы грудной клетки [Chest organs]	ЗП [PA]	0,08	0,22	0,1
	Б [LAT]	0,09	0,12	0,22
Череп [Skull]	ПЗ [AP]	0,06	0,07	0,1
	Б [LAT]	0,02	0,03	0,05
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	ПЗ [AP]	0,03	0,05	0,11
	Б [LAT]	0,06	0,12	0,09
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	ПЗ [AP]	0,17	0,38	0,41
	Б [LAT]	0,15	0,32	0,33
Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	ЗП [PA]	0,37	0,85	0,82
	Б [LAT]	0,23	0,41	0,93
Плечо [Shoulder]	-	0,001	0,03	-
	ПЗ [AP]	0,44	0,60	0,93
Таз, крестец [Pelvis, sacrum]	Б [LAT]	0,2	0,24	-
	ПЗ [AP]	0,29	0,55	0,93

Значительно меньшие значения РДУ для г. Москвы по сравнению с Рязанской областью объясняются тем, что в Рязанской области РДУ устанавливались совместно для цифровых и аналоговых рентгеновских аппаратов. Расхождения между значениями РДУ г. Москвы и в целом значениями по стране требуют отдельного исследования. Данные расхождения предположительно связаны с более новым

парком оборудования в г. Москва, чем в целом по стране, а также тем, что в выборку по г. Москве попали только цифровые рентгеновские аппараты.

В таблице 3 представлено сравнение РДУ г. Москвы, определенных в значениях дозиметрической единицы произведение дозы на площадь (ПДП), сГр·см² со значениями, установленными в ряде стран.

Таблица 3

Сравнение значений РДУ (ПДП, сГр·см²) г. Москвы с РДУ, применяемыми в ряде стран

[Table 3

Comparison of the DRL values (DAP, cGy·cm²) for Moscow with DRL used in another countries]

Область исследования [Study area]	Проекция [Projection]	РДУ _{ПДП} , сГр·см ² [DRL _{ДАП} , cGy·cm ²]					
		Настоящая работа (2023) [This work (2023)]	Франция, (2017) [12] [France (2017) [12]]	Германия (2016) [12] [Germany (2016) [12]]	UK (2012) [12] [UK (2012) [12]]	Нидерланды [25] [Netherlands [17]]	Ирландия [26] [Ireland [18]]
Органы грудной клетки [Chest organs]	ЗП [PA]	85	20	15	10	12	12
	Б [LAT]	190	60	40	-	-	-
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	ПЗ [AP]	110	40	-	15	-	16
	Б [LAT]	270	40	-	15	-	19
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	ПЗ [AP]	170	120	110	100	-	76
	Б [LAT]	450	150	140	150	-	180
Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	ЗП [PA]	330	300	200	150	-	160
	Б [LAT]	900	450	350	250	-	224
Таз, крестец [Pelvis, sacrum]	ПЗ [AP]	480	450	250	220	300	191
	Бедро [Hip]	-	120	150	110	-	-
Брюшная полость [Abdominal cavity]	-	310	400	230	250	300	170

В ходе исследования установлено, что значения РДУ, определённые в г. Москве, почти для всех рентгенографических исследований превышают аналогичные значения для цитированных европейских стран, что показывает необходимость дополнительного анализа и поиска путей решения по оптимизации протоколов [12, 17, 18].

На основе результатов анализа будут проведены мероприятия снижения дозовой нагрузки путем организации работ по циклу Деминга (PDCA) – Планирование-Выполнение исследований-Изучение/проверка-Корректировка³. Проведение оптимизации рентгенологических исследований для достижения лучших мировых практик и повышения уровня радиационной защиты пациентов является приоритетным направлением для организации здравоохранения и доказательной медицины.

Ввиду большого разнообразия видов рентгенодиагностических аппаратов и расширенной номенклатуры рентгенографических исследований внедрение РДУ в медицинские организации г. Москвы невозможно представить без применения информационных технологий. Разработанные РДУ будут применяться в системе мониторинга доз пациентов медицинских организаций г. Москвы для оптимизации доз облучения пациента при диагностических исследованиях⁸ [19, 20].

Заключение

По итогу работы по определению значений референтных диагностических уровней при проведении наиболее часто применяемых рутинных рентгенографических процедур получены следующие результаты:

- выявленные случаи аномально высоких доз указали на те медицинские организации, в которых необходимо провести анализ качества работы рентгеновского аппарата для выявления причин настолько высоких значений и при необходимости проведения оптимизации протоколов исследования;
- определяя и применяя РДУ в «рутиной» практике, появляется возможность повышения эффективности работы отделения в части радиационной безопасности в соответствии с существующими рекомендациями;
- по результатам работы выдвинуто предположение что программное обеспечение для автоматического определения РДУ позволит существенно сократить временные затраты и уменьшить количество ошибок, связанных с человеческим фактором.

Внедрение полученных в ходе данной работы значений референтных диагностических уровней при проведении рентгенографических исследований в г. Москве послужит средством достижения показателей образцовой практики лучевой диагностики, а численные значения войдут в систему мониторинга дозовой нагрузки пациентов медицинских организаций г. Москвы.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы

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

Наибольший вклад распределён следующим образом:

Дружинина Юлия Владимировна – дизайн исследования, поиск публикаций по теме, анализ литературы, обработка полученных результатов, написание текста;

Лантух Зоя Александровна – дизайн исследования, обработка полученных результатов, систематизация и редактирование статьи;

Толкачев Кирилл Владимирович – обработка полученных результатов, систематизация и редактирование статьи;

Солдатов Илья Владимирович – экспертная оценка списка литературы, редактирование статьи;

Шатёнок Мария Петровна - редактирование статьи;

Водоватов Валерий Александрович - систематизация и редактирование статьи;

Дружинина Полина Сергеевна - обработка полученных результатов;

Шацкий Илья Геннадьевич - обработка полученных результатов;

Рыжов Сергей Александрович - финальное редактирование статьи.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИР «Научное развитие медико-технологических и организационных аспектов обеспечения радиационной безопасности при оказании медицинской помощи», (№ ЕГИСУ: №123031500006-9) в соответствии с Приказом от 21.12.2022 г. № 1196 "Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов" Департамента здравоохранения города Москвы.

Литература

1. Публикация МКРЗ 105. Радиационная защита в медицине. Под ред. русского перевода М.И. Балонов. СПб.: ФБУН НИИРГ, 2011. 66 с.
2. Радиологическая защита при медицинском облучении ионизирующим излучением: руководство по безопасности № RS-G-1.5. Вена: МАГАТЭ, 2004. 208 с.
3. International commission on radiation units and measurements, Patient dosimetry for X Rays Used in Medical Imaging. Rep. 74. ICRU Bethesda. MD. 2006. 220 p.
4. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В. и др. Научные основы радиационной защиты в современной меди-

⁸ Методические указания № 122 Применение аналитических информационных систем. Раздел 1. Система оценки персональных радиационных рисков облучения пациента при обосновании назначения рентгенологических и радионуклидных исследований. М.: ДЗМ, 2020. 26 с. [Methodological recommendations No. 122. Application of analytical information systems. Section 1. System for assessing the patient's personal radiation risks when justifying a referral for X-ray and radionuclide examinations Moscow: DZM; 2020. 26 p. (In Russ.)]

- цине. Том 1. Лучевая диагностика: Монография, пособия. Под ред. проф. М.И. Балонова. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2019. Т.1. 320 с.
5. Водоватов А.В. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 47-55.
 6. Аकोпова Н.А., Иванов С.И., Охрименко С.Е. Оптимизация доз облучения пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т. 61, № 4. С. 48-51.
 7. Стадник Л.Л., Шалепа О.Ю., Носик О.В. Оценка доз пациентов в рентгенографии и их оптимизация путем установления национальных диагностических рекомендуемых уровней // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 84-88.
 8. Алехнович А.В., Аकोпова Н.А., Дружинина Ю.В. Анализ и интерпретация эффективных доз медицинского облучения по Рязанской области // Медицинская физика. 2019. № 4 (84). С. 60-68.
 9. Roch P., Célier D., Dessaud C. Using diagnostic reference levels to evaluate the improvement of patient dose optimisation and the influence of recent technologies in radiography and computed tomography // European Journal of Radiology. 2018. Vol. 98. P. 68-74. DOI: 10.1016/j.ejrad.2017.11.002.
 10. Valéro M., Veit R., Kamenopoulou V. The Diagnostic Reference Levels (DRLs) in Europe. // European alara network. 2007. URL: <https://www.eu-alara.net/index.php/activities/surveys/156-drls.html> (Дата обращения: 12.04.2024).
 11. Konate I., Monnehan G.A., Gogon B.D.L. Diagnostic Reference Level in Frontal Chest X-Ray in Western Côte d'Ivoire // World Journal of Nuclear Science and Technology. 2019. P. 147-158.
 12. National Diagnostic Reference Levels (NDRLs) from 13 October 2022 // UK Health Security Agency. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/diagnostic-radiology-national-diagnostic-reference-levels-ndrls/ndrl> (Дата обращения: 12.04.2024).
 13. European Study on Clinical Diagnostic Reference Levels for X-ray Medical Imaging. Report and review on existing clinical DRLs 2018. URL: http://www.eurosafeimaging.org/wp/wpcontent/uploads/2017/09/D2.1_Report-and-review-on-existing-clinicalDRLs_final_published-on-website.pdf. (Дата обращения: 12.04.2024).
 14. ICRP. Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. ICRP Publication 135. 2017. 46(1). 144 p.
 15. Edyvean S. Establishing and Using DRLs for optimisation in Radiography. ICTP-IAEA Workshop on Establishment and Utilization of Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging (smr3333): November 2019 Trieste, Italy. URL: <https://indico.ictp.it/event/8729/session/2/contribution/12/material/slides/0.pdf> (Дата обращения: 12.04.2024).
 16. John Damilakis J., Frija G., Brkljacic B. ESR. How to establish and use local diagnostic reference levels: an ESR EuroSafe Imaging expert statement // Insights into Imaging. 2023. Vol. 14. [https://DOI: 10.1186/s13244-023-01369-x](https://doi.org/10.1186/s13244-023-01369-x) (Дата обращения: 12.04.2024).
 17. Zweers D., Geleijns K., Veldkamp W. Diagnostic Reference Levels (DRL's) and Target Dose Levels in The Netherlands. 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, SECC Glasgow, Scotland, may 13-18, 2012. URL: <https://www.irpa.net/members/P07.66%20v2.pdf> (Дата обращения: 12.04.2024).
 18. Diagnostic Reference Levels Guidance on the establishment, use and review of diagnostic reference levels for medical exposure to ionising radiation. Regulation directorate health information and quality authority (HIQA). 2021. URL: https://www.hiqa.ie/sites/default/files/2021-07/Diagnostic-Reference-Levels_Undertaking-guidance.pdf (Дата обращения: 12.04.2024).
 19. Дружинина Ю.В., Рыжов С.А., Солдатов И.В. и др. Возможности применения специализированного программного обеспечения для замены отчётных форм // Медицинская Физика. 2022. № 1(93). С. 26-27.
 20. Шатёнок М.П., Рыжов С.А., Лантух З.А. Возможности программного обеспечения для мониторинга дозовой нагрузки пациентов в лучевой диагностике // Digital Diagnostics. 2022. Т. 3, № 3. С. 212-230.

Поступила: 12.04.2024

Дружинина Юлия Владимировна – эксперт отдела дозиметрического контроля и медицинской физики Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы; преподаватель кафедры радиационной гигиены и радиационной безопасности им. Ф.Г. Кроткова Российской медицинской академии непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 127051, Россия, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1; E-mail: DruzhininaYV2@zdrav.mos.ru

ORCID: 0000-0002-3230-3722

Лантух Зоя Александровна – начальник отдела дозиметрического контроля и медицинской физики Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-6623-9610

Толкачев Кирилл Владимирович – эксперт отдела дозиметрического контроля и медицинской физики Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-8871-8700

Солдатов Илья Владимирович – начальник испытательной лаборатории Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-4867-0746

Шатёнок Мария Петровна – эксперт отдела дозиметрического контроля и медицинской физики Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-9217-7011

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, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Дружинина Полина Сергеевна – младший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-2921-067X

Шацкий Илья Геннадьевич – научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-2809-0223

Рыжов Сергей Анатольевич – вице-президент Ассоциации медицинских физиков России, научный сотрудник Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы; начальник отдела радиационной безопасности и медицинской физики Национального медицинского исследовательского центра детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-0640-7368

Для цитирования: Дружинина Ю.В., Лантух З.А., Толкачев К.В., Солдатов И.В., Шатёнок М.П., Водоватов А.В., Дружинина П.С., Шацкий И.Г., Рыжов С.А. Референтные диагностические уровни при проведении рентгенографических исследований в г. Москве // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 103–113. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-103-113.

Diagnostic reference levels for the city of Moscow during X-ray examinations

Yulia.V. Druzhinina^{1,2}, Zoya A. Lantukh¹, Kirill V. Tolkachev¹, Ilya V. Soldatov¹, Mariya P. Shatenok¹, Aleksandr V. Vodovatov⁴, Polina S. Druzhinina⁴, Ilya G. Shatsky⁴, Sergey A. Ryzhov^{1,3}

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

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³ Dmitry Rogachev National Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁴ 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

Diagnostic reference levels are one of the effective tools for optimizing patient radiation doses in diagnostic radiology. The staff of domestic radiology departments does not have an understanding of the development process and use of diagnostic reference levels during X-ray examinations, although this tool is a generally accepted in practice abroad. The article shows the experience of forming regional diagnostic reference levels based on measurements provided by the accredited testing laboratory of the Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department. The diagnostic reference levels for radiography in Moscow were developed for eight of the most common types of examinations based on the operation of 216 digital X-ray machines. The resulting levels, expressed in the dose-area product (cGy·cm²) and effective dose (mSv), were compared with the local diagnostic reference levels for the Ryazan region, Russia, and national diagnostic reference levels for other countries. The analysis showed continuity in the values. Some types of studies have been optimized. The developed diagnostic reference levels are the quality performance indicators for diagnostic radiology departments and will be used to optimize a patient radiation dose during diagnostic studies in Moscow.

Key words: medical exposure, patients, effective dose, diagnostic reference level, standard dose, X-ray diagnostic machine.

Yulia.V. Druzhinina

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

Address for correspondence: Petrovka Str., 24, building 1, Moscow, 127051, Russia; E-mail: DruzhininaYV2@zdrav.mos.ru

Authors' personal contribution

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

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

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

Kirill V. Tolkachev – data processing, systematization and editing of the review;

Ilya V. Soldatov – expert evaluation of literature review, editing of the review;

Mariya P. Shatenok – editing of the review;

Aleksandr V. Vodovатов – systematization and editing of the review;

Polina S. Druzhinina – data processing;

Ilya G. Shatsky – data processing;

Sergey A. Ryzhov – final editing of the review.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

This paper was prepared by the group of authors as a part of the research and development effort titled "Scientific advances in medical, technological and organizational aspects of radiation safety in health care" (USIS No.:№123031500006-9) in accordance with the Order No. 1196 dated December 21, 2022 "On approval of state assignments funded by means of allocations from the budget of the city of Moscow to the state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Moscow Health Care Department, for 2023 and the planned period of 2024 and 2025" issued by the Moscow Health Care Department.

References

- ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. Ed. Russian translation by MI Balonov. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. PV Ramzaev; 2011. 66 p. (In Russian).
- Radiological protection during medical exposure to ionizing radiation: Safety manual No. RS-G-1.5. Vienna: IAEA; 2004. 208 p.
- International commission on radiation units and measurements, Patient dosimetry for X Rays Used in Medical Imaging. Rep. 74. ICRU Bethesda. MD; 2006. 220 p.
- Balonov MI, Golikov Vy, Vodovатов AV. Scientific foundations of radiation protection in modern medicine. Volume 1. Diagnostic radiology: Monograph, manuals. Ed. by Prof. MI Balonov. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. PV Ramzaev; 2019. Vol. 1. 320 p. (In Russian).
- Vodovатов AV. Practical implementation of the concept of diagnostic reference levels to optimize patient protection during standard radiographic examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 47-55. (In Russian).
- Akopova NA, Ivanov SI, Okhrimenko SE. Optimization of radiation doses to patients during X-ray diagnostic examinations. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2016;61(4): 48-51. (In Russian).
- Stadnik LL, Shalepa OYu, Nosik OV. Assessment of patient doses in radiography and their optimization by establishing determining national diagnostic reference levels. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 84-88. (In Russian).
- Alekhnovich AV, Akopova NA, Druzhinina YuV, Ermolina EP, Loginova SV, Cherednikova VI. Analysis and interpretation of effective doses of medical radiation in the Ryazan region. *Meditsinskaya fizika = Medical Physics*. 2019;4(84): 60-68. (In Russian).
- Roch P, Célier D, Dessaud C. Using diagnostic reference levels to evaluate the improvement of patient dose optimisation and the influence of recent technologies in radiography and computed tomography. *European Journal of Radiology*. 2018;98: 68-74. DOI: 10.1016/j.ejrad.2017.11.002.
- Valéro M, Veit R, Kamenopoulou V. The Diagnostic Reference Levels (DRLs) in Europe. European alara network. 2007. Available from: <https://www.eu-alara.net/index.php/activities/surveys/156-drls.html> (Accessed: 12.04.2024).
- Konate I, Monnehan GA, Gogon BDL. Diagnostic Reference Level in Frontal Chest X-Ray in Western Côte d'Ivoire. *World Journal of Nuclear Science and Technology*. 2019: 147-158.
- National Diagnostic Reference Levels (NDRLs) from 13 October 2022. UK Health Security Agency. Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/diagnostic-radiology-national-diagnostic-reference-levels-ndrls/ndrl> (Accessed: 12.04.2024).
- European Study on Clinical Diagnostic Reference Levels for X-ray Medical Imaging. Report and review on existing clinical DRLs 2018. Available from: http://www.eurosafeimaging.org/wp/wpcontent/uploads/2017/09/D2.1_Report-and-review-on-existing-clinicalDRLs_final_published-on-website.pdf (Accessed: 12.04.2024).
- ICRP. Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. ICRP Publication 135. 2017;46(1): 144.
- Edyvean S. Establishing and Using DRLs for optimisation in Radiography. ICTP-IAEA Workshop on Establishment and Utilization of Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging (smr3333): November 2019 Trieste, Italy. Available from: <https://indico.ictp.it/event/8729/session/2/contribution/12/material/slides/0.pdf> (Accessed: 12.04.2024).
- John Damilakis J, Frijia G, Brkljacic B. ESR. How to establish and use local diagnostic reference levels: an ESR EuroSafe Imaging expert statement. *Insights into Imaging*. 2023;14. <https://DOI: 10.1186/s13244-023-01369-x> (Accessed: 12.04.2024).
- Zweers D, Geleijns K, Veldkamp W. Diagnostic Reference Levels (DRL's) and Target Dose Levels in The Netherlands. 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, SECC Glasgow, Scotland, may 13-18 2012. Available from: <https://www.irpa.net/members/P07.66%20v2.pdf> (Accessed: 12.04.2024).
- Diagnostic Reference Levels Guidance on the establishment, use and review of diagnostic reference levels for medical exposure to ionising radiation. Regulation directorate health information and quality authority (HIQA). 2021. Available from: https://www.hiqa.ie/sites/default/files/2021-07/Diagnostic-Reference-Levels_Undertaking-guidance.pdf (Accessed: 12.04.2024).
- Druzhinina YuV, Ryzhov SA, Soldatov IV, Lantukh ZA, Shatenok MP. Possibilities of applying a specialized software to replace reporting forms. *Meditsinskaya fizika = Medical Physics*. 2022;1(93): 26-27. (In Russian).
- Shatenok MP, Ryzhov SA, Lantukh ZA, Druzhinina YuV, Tolkachev KV. Possibilities of software for monitoring the dose load of patients in radiation diagnostics. *Digital Diagnostics*. 2022; 3(3): 212-230. (In Russian).

Received: April 12, 2024

For correspondence: Yulia.V. Druzhinina – Expert of department of dosimetry and medical radiation physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department; Lecturer of the Department of Radiation Hygiene and Radiation Safety named after. F.G. Krotkov of Russian Medical Academy of Continuous Professional Education (Petrovka Str., 24, building 1, Moscow, 127051, Russia; E-mail: DruzhininaYV2@zdrav.mos.ru)

ORCID: 0000-0002-3230-3722

Zoya A. Lantukh – Head of the department of dosimetry and medical physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-6623-9610

Kirill V. Tolkachev – Expert of department of dosimetry and medical radiation physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-8871-8700

Ilya V. Soldatov – Head of Laboratory, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-4867-0746

Mariya P. Shatenok – Expert of department of dosimetry and medical radiation physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-9217-7011

Aleksandr V. Vodovatov – Candidate of Biological Sciences, lead research fellow, Head of the Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Polina S. Druzhinina – Junior researcher, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-2921-067X

Ilya G. Shatsky – Researcher, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-2809-0223

Sergey A. Ryzhov – Vice president of the Association of Medical Physicists in Russia, research fellow in the Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department; head of the radiation safety and medical physics department of the Dmitry Rogachev National Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-0640-7368

For citation: Druzhinina Yu.V., Lantukh Z.A., Tolkachev K.V., Soldatov I.V., Shatenok M.P., Vodovatov A.V., Druzhinina P.S., Shatsky I.G., Ryzhov S.A. Diagnostic reference levels of the city of Moscow during X-ray examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 103–113. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-103-113.

Анализ безопасности при ветровом подъеме радиоактивных веществ с береговой линии Теченского каскада водоемов

А.В. Пыхова¹, А.А. Екидин², М.Е. Васянович², К.Л. Антонов²

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

В работе дана оценка вероятности и последствий внешних событий, способных привести к инциденту с нарушением сформированных барьеров безопасности, ограничивающих распространение радиоактивных веществ береговой линии Теченского каскада водоемов. Исходными событиями такого инцидента могут стать неблагоприятные метеорологические условия, в результате которых произойдет понижение уровня воды в водоемах каскада ниже границ заданных проектных отметок. Осушение поверхности ранее обводненных участков береговой линии сформирует протяженный источник загрязнения атмосферного воздуха при ветровом подъеме техногенных радионуклидов. Вероятная площадь осушенных участков составит 0,02 – 0,08 км² для водоема В-3, 0,06 – 0,3 км² для водоема В-4, 0,2 – 0,9 км² для водоема В-10 и 0,5 – 2,2 км² для водоема В-11. Суммарная запасенная активность на указанной территории превышает 10⁶ Бк/м² ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Активность, поступающая в атмосферу в течении часа, составит от 3,7·10⁸ до 8,5·10¹¹ Бк для скорости ветра 5 м/с и 20 м/с соответственно. Вероятности совместной реализации сильного ветра и условия засушливости составляют 6,8·10⁷ в год при скорости ветра 20 м/с и 2,1·10³ в год при скорости ветра 5 м/с. Наибольшие значения эффективной дозы для населения ближайших населенных пунктов, составляющие 1–3 мкЗв за первые 10 суток и более 200 мкЗв за первый год, достигаются при экстремальных ветровых нагрузках со скоростью ветра 20 м/с и более.

Ключевые слова: Теченский каскад водоемов, береговая линия, засуха, ветровой подъем, модель переноса, радионуклиды, эффективная доза, индикаторы безопасности.

Введение

Каскад промышленных водоемов на реке Теча (ТКВ), созданный для ограничения радиоактивного загрязнения окружающей среды, эксплуатируется в качестве хранилища жидких радиоактивных отходов [1, 2]. Беспрепятственное поступление с поверхности водоемов радиоактивных веществ в газообразной и аэрозольной формах позволяет отнести их к числу наиболее масштабных площадных неорганизованных источников загрязнения атмосферного воздуха [3–6]. Управление неорганизованными источниками в нормальных условиях эксплуатации сопровождается инженерными и организационными мероприятиями, направленными на минимизацию радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Изменения или существенные отклонения условий эксплуатации может привести к последствиям во внешней среде, которые не могут игнорироваться с точки зрения защиты или безопасности. Анализ и оценка опасностей, прогнозирование показателей и условий эксплуатации ТКВ позволяют сделать обоснованный выбор индикаторов безопасности, а при необходимости и мер по ограничению воздействия на человека и окружающую среду [7, 8].

Влияние на условия эксплуатации ТКВ могут оказать современные тенденции климатических изменений на территории России, выраженные, например, в увеличении частоты среднегодовых и сезонных аномалий температур приземного воздуха и продолжительности засушливых

периодов [9]. В регионе расположения ТКВ нередки засухи и атмосферные явления, способствующие дефляции радиоактивных веществ с подстилающих поверхностей [10, 11]. Продолжительное отсутствие осадков, понижение влажности и длительные интервалы повышенных температур воздуха приведут к понижению уровня водоемов и, как следствие, к исчезновению барьера безопасности между атмосферой и накопленной активностью в отложениях осушенной береговой линии. В такой ситуации вероятен ветровой подъем и перенос радиоактивных веществ с высохшей береговой линии ТКВ. Индикаторами безопасности этих событий могут быть характеристики скорости ветра, площадь и запас активности осушенной береговой линии.

Примером реализации рассматриваемого сценария является ветровой подъем радиоактивной пыли с береговой линии озера Карачай (водоем В-9) в 1967 году в засушливый период. Продолжительный летний жаркий период способствовал понижению уровня водоема В-9, что привело к подъему ветром с высушенной береговой линии значительной части радиоактивности (~2,22·10¹⁴ Бк) и её выпадениям на территории площадью 1660 км² [12, 13]. Оценка коллективной дозы облучения населения в результате ветрового подъема активности с осушенной береговой линии озера Карачай составила 700 чел.-Зв [14]. В наиболее загрязненных населенных пунктах дополнительное облучение населения за 1967 год оценивалось в интервале 0,8 – 1,0 мЗв/год [12]. Актуальные ожидаемые значения годовой эффективной дозы при длительном нахождении на обще-

Пыхова Александра Владимировна

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Адрес для переписки: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; E-mail: a.v.nazarovich@mail.ru

ственно доступных участках с повышенным содержанием ^{137}Cs , вынесенного с озера Карачай, не превышают четверти годового предела дозы для населения [15]. Несмотря на отсутствие серьезных радиационных последствий для населения и окружающей среды, инцидент 1967 на озере Карачай показал потенциальную радиологическую и радиоэкологическую опасность повторения подобных ситуаций на промышленных водоемах Теченского каскада.

Сочетание периодов сильных ветровых нагрузок с возможным осушением береговой линии ТКВ, где накоплен относительно большой запас радиоактивности, обуславливает актуальность исследований потенциального радиационного воздействия на население при возникновении указанных неблагоприятных метеорологических условий. В долгосрочной перспективе анализ потенциального облучения населения из-за природных и техногенных воздействий на ТКВ является центральной в проблеме безопасности населения с позиции современной международной системы радиационной защиты [16]. Опубликованные результаты исследований содержат информацию об оценках ветрового выноса радиоактивных веществ, депонированных в илах промышленных водоемов ФГУП «ПО «МАЯК», при возникновении экстремальных ветровых нагрузок, но не включают оценку эффективных доз на население в результате ветрового выноса радиоактивных веществ [6].

Цель исследования – оценка радиационного воздействия на население в близлежащих населенных пунктах, формируемого ветровым переносом ^{137}Cs и ^{90}Sr с береговой линии ТКВ в условиях засухи. Для достижения поставленной цели определены и реализованы задачи:

- оценены осушаемые площади и запас радиоактивных веществ в прибрежной зоне каждого водоема;
- определена вероятность возникновения неблагоприятных метеоусловий, заключающихся одновременно в наличии сильного ветра и засухливости на рассматриваемой территории;
- разработана цифровая модель потенциального источника выброса для береговой линии каждого водоема ТКВ;
- рассчитаны эффективные дозы от ветрового выноса радиоактивных веществ с осушенной береговой линии ТКВ;
- обоснованы численные значения выбранных индикаторов безопасности, сигнализирующих о вероятном нарушении пределов безопасной эксплуатации ТКВ.

Материалы и методы

Объект исследования

ТКВ – изолированный от открытой гидрографической системы гидрогеологический природно-техногенный объект: открытое поверхностное хранилище жидких радиоактивных отходов площадью 67,4 км² и объемом 357,9 млн. м³, состоящий из четырех водоемов (В-3, В-4, В-10, В-11) и плотин (П-3, П-4, П-10 и П-11), системы обводных каналов и ряда гидротехнических сооружений, включающих ограждающие дамбы и подпорные сооружения [17–19]. Длина береговой линии ТКВ при нормальном подпорном уровне составляет 108,4 км [1]. В водный баланс водоемов, помимо естественных составляющих (осадки, испарение, поверхностный и подземный сток, фильтрационный приток и отток), существенный вклад вносят сбросы сточных вод (в водоёмы В-3 и В-4) и перетоки через водопропускные устройства плотин (В-3, В-4, В-10) [20]. В теплый период года открытая поверхность промышленных водоемов создает условия для поступления радиоактивных веществ в атмосферу при капельном уносе вод-

ного аэрозоля, испарении воды, выбросе метана, содержащего тритий [4, 5, 21, 22].

Оценка запасенной активности в осушаемой береговой линии ТКВ

Размеры осушаемой площади каждого водоема рассчитывались для условий безопасной эксплуатации ТКВ на заданных проектных отметках водоема В-11 от 215,0 до 217,32 м [1]. Большая часть радиоактивных веществ накапливается в донных отложениях [23]. По удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr загрязнение донных отложений в пространстве относительно равномерное [1]. В расчетах запаса активности в осушаемой береговой линии каждого водоема ТКВ принято равномерное пространственное распределение загрязнения донных отложений. Для оценки эффективных доз используются опубликованные значения удельной активности в донных отложениях ТКВ [20].

Известные значения удельной активности донных отложений и полученные в настоящей работе размеры вероятной площади осушенной береговой линии каждого водоема позволили оценить запасенную активность в береговой линии ТКВ для толщины отложений до 10 см. Величина поднятой активности с поверхности береговой линии определена на основе теории ветровой эрозии почв, согласно которой количество поднятой пыли зависит от скорости ветра [6].

Вероятности неблагоприятных событий

Вероятности неблагоприятных событий оцениваются для совместного появления засухливости и экстремальных ветровых нагрузок в районе ТКВ. Частота засухливости определялась на основе метеорологических данных метеостанции Аргаяш (WMO ID: 28548) с использованием индексов засухливости: гидротермического коэффициента Селянинова, стандартизированного индекса осадков, плювиометрического коэффициента [24]. Оценка вероятности реализации экстремальных ветровых нагрузок определялась как частота повторяемости скорости ветра, зарегистрированной на метеостанции Аргаяш в период наблюдений с 2006 по 2023 год [25].

Цифровая модель источников выбросов

Для визуализации существующих границ ТКВ со значениями активности, содержащейся в осушенной береговой линии, была разработана цифровая модель водоемов ТКВ. На рисунке 1 представлено разбиение береговой линии на множество единичных квадратных сегментов.

При расчете мощности выброса и рассеивания радиоактивных аэрозолей в атмосфере приняты следующие допущения¹:

- источник с единичной площадью центрирован и имеет форму квадрата со стороной 2а;
- использованные модели рассеивания применимы для расчета на расстояниях до 50 км;
- принято равномерное распределение активности радионуклидов по площади осушенной береговой линии.

В модельных расчетах установлено, что величина эффективной дозы на расстояниях расположения близлежащих населенных пунктов не зависит от размера стороны единичного квадратного сегмента береговой линии. Поэтому в последующих расчетах используется величина 2а = 300 м.

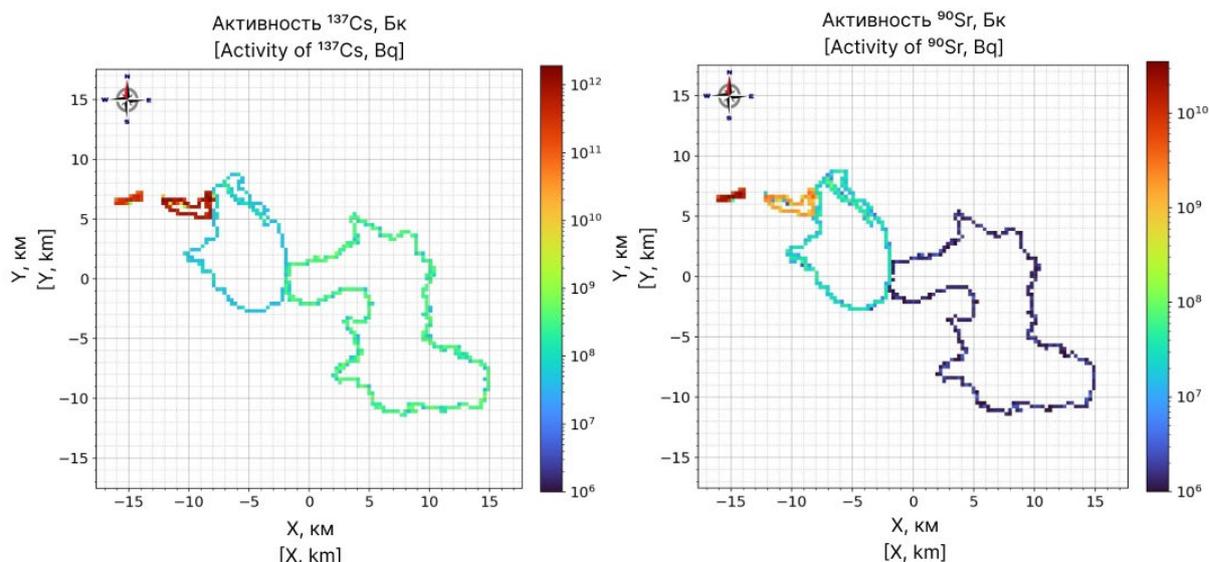


Рис. 1. Цифровая модель карты активности береговой линии ТКВ для ^{137}Cs и ^{90}Sr
 [Fig. 1. Digital model of the TRC coastline activity map for ^{137}Cs and ^{90}Sr]

Оценка эффективной дозы от ветрового выноса активности

В настоящей работе оценивается радиационное воздействие на жителей населенных пунктов вблизи ТКВ в случае загрязнения атмосферы, сформированного разовым ветровым подъёмом радиоактивной пыли суммарно с каждого единичного квадратного сегмента береговой линии промышленных водоемов. Консервативно предполагается, что в момент подъёма пыли с любого квадратного сегмента ветер направлен в сторону рассматриваемого населенного пункта. Значение объемной активности радионуклидов в приземном слое атмосферы на участке воздействия принимается как суперпозиция активности, перенесенной с каждого квадратного сегмента береговой линии с учетом истощения радиоактивного облака. Оценка эффективной дозы на население учитывает внутреннее облучение при поступлении радионуклидов от ингаляции и с продуктами питания и внешнее облучение от облака и по-

верхности почвы¹.

В расчетах приняты соответствующие коэффициенты дозового преобразования для каждого радионуклида r из нормативных документов:

- при внешнем облучении от радиоактивного облака², $\text{Зв} \cdot \text{м}^3 / (\text{Бк} \cdot \text{с})$;
- при внешнем облучении от поверхности почвы², $\text{Зв} \cdot \text{м}^2 / (\text{Бк} \cdot \text{с})$;
- при ингаляционном поступлении радионуклида³, $\text{Зв} / \text{Бк}$;
- при поступлении радионуклида с пищей³, $\text{Зв} / \text{Бк}$.

Годовое потребление пищевых продуктов молочного, растительного или животного происхождения принималось для лиц критической группы.

С учетом вероятности неблагоприятных метеоусловий проведено моделирование максимально возможных уровней радиационного воздействия на население ближайших населенных пунктов в начальный период (за первые 10 суток, $E_{total10}^{j,r}(x)$) и за первый год ($E_{total>10}^{j,r}(x)$) после однора-

¹ Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла» (РБ-134-17): утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 16 ноября 2017 № 479. М.: ФБУ НТЦ ЯРБ, 2017 [Safety Guidelines for the Use of Atomic Energy "Recommended methods for assessing and predicting the radiation consequences of accidents at nuclear fuel cycle facilities" (SG-134-17): approved by the Ord. No.479 of Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia on the 16th November 2017. Moscow: Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, 2017 (in Russ.)]

² Руководство по безопасности «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» (РБ-106-21): утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 авг. 2021 № 288. М.: ФБУ НТЦ ЯРБ, 2021 [Safety Guidelines "Recommended methods for calculating the parameters necessary for the development and establishment of standards for maximum permissible emissions of radioactive substances into the atmospheric air" (SG-106-21): approved by the Ord. No.288 of Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia on the 30th August 2021. Moscow: Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, 2015 (in Russ.)]

³ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 №47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный No 14534 [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534. (In Russ.)]

зового ветрового подъёма и переноса радиоактивной пыли с поверхности осушенных участков прибрежной зоны ТКВ. Оценки радиационного воздействия выполнены для радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr (r) на различных расстояниях от источника выброса (x). Величина эффективной дозы принимается равной максимальному из значений доз, рассчитанных для шести категорий устойчивости атмосферы (l) по параметризации Пасквилла–Гиффорда (A, B, C, D, E, F).

В расчетах эффективной дозы использовались различные значения выбранных индикаторов безопасности: ветровые нагрузки, площадь и запас активности осушенной береговой линии. Процедура расчета реализована в программном коде с учетом рекомендаций и справочных данных документа⁴. Для оценки поднятой активности с поверхности береговой линии использованы справочные данные, которые соответствуют составу донных отложений ТКВ [6].

Оценка численных значений индикаторов безопасности состояния береговой линии ТКВ

Первоначальными проектами создания промышленных водоемов на реке Теча и в последующей практике их эксплуатации не предусматривалось обоснование нормативов поступления радиоактивных веществ в атмосферный воздух, что объясняет отсутствие установленных эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации для выбросов из ТКВ. Учитывая требование не превышения 0,1 мЗв годовой эффективной дозы облучения критической группы населения при всех видах обращения с радиоактивными отходами до их захоронения⁵, целесообразно рассмотреть:

- предел безопасной эксплуатации для условий формирования годовой дозы $E_{total>10}^{j,r}(x) = 1$ мЗв;
- эксплуатационный предел для условий формирования годовой дозы $E_{total>10}^{j,r}(x) = 100$ мкЗв.

Рассматриваемые сценарии облучения населения однозначно связывают величину годовой эффективной дозы и активность выброса в атмосферу с осушенной поверхностью водоемов ТКВ. Чем больше площадь осушенной береговой линии, тем больший запас активности лишается барьера безопасности в виде водной поверхности, способный формировать загрязнение атмосферы в случае ветрового подъёма. Для демонстрации возможности использования индикаторов безопасности принимаются условия равномерного поверхностного загрязнения грунтов береговой линии.

При осушении принимается одинаковое изменение ширины береговой линии каждого водоема без учета уклона поверхности к горизонту. Длина береговой линии принимается постоянной, поэтому площадь осушения и активность ^{137}Cs и ^{90}Sr , способная поступить в атмосферу, будут

пропорциональны ширине осушенной береговой линии. В этом случае ширина линии осушения может служить одним из индикаторов вероятного масштаба облучения. Другим фактором, влияющим на дозу облучения, является скорость ветра над осушенной поверхностью. При известной площади осушения ветровая нагрузка также может сигнализировать, служить индикатором, возможного достижения или превышения выбранного порогового уровня облучения критической группы населения.

Оценки $E_{total>10}^{j,r}(x)$ для фиксированных значений скорости ветра и ширины осушения береговой линии ТКВ, а, следовательно, площади и запаса активности, способных создать годовую дозу критической группы населения 100 мкЗв и 1 мЗв могут служить индикаторами вероятного превышения эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации ТКВ.

Результаты и обсуждение

Оценка вероятности неблагоприятных событий

Анализ метеорологических данных с метеостанции Аргаяш с 2006 по 2021 годы позволил оценить частоту реализации засушливости (таблица 1) в виде индексов засушливости: гидротермического коэффициента Селянинова, стандартизированного индекса осадков, плувиометрического коэффициента [24]. Полученные значения используются для оценки вероятности реализации засушливости на территории ТКВ.

Таблица 1

Частота реализации засушливости

[Table 1

Aridity occurrence]		
Индекс засушливости [Drought index]	Число случаев за время наблюдения* [Occurrences rate during the period of monitoring*]	Принятая в расчет вероятность [Assumed probability]
Коэффициент Селянинова [the Selyaninov's coefficient]	0	–
Стандартизированный индекс осадков [Standardized pluvial index]	1	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Плувиометрический коэффициент [Pluviometric coefficient]	1	$6,2 \cdot 10^{-2}$

* время наблюдения 15 лет
[*the period of monitoring is 15 years]

⁴ РБ-134-17 [SG-134-17 (In Russ.)]

⁵ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 No 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный No 18115), с изменениями, внесенными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 No 43 (зарегистрировано Минюстом России 05.11.2013, регистрационный No 30309) (далее – ОСПОРБ 99/2010). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18155), as amended by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 16.09.2013 No. 43 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No. 30309) (hereinafter – OSPORB 99/2010). (In Russ.)]

Вероятность реализации экстремальных ветровых нагрузок в районе расположения водоемов ТКВ оценена ниже (см. таблицу 3). В расчетах радиационного воздействия в рамках данного исследования используются оценки вероятности одновременного возникновения засушливости и экстремальных ветровых нагрузок как произведение вероятностей каждого из этих событий в отдельности.

Оценка площади осушенной береговой линии ТКВ

С целью определения запасенной активности по данным инструментальных измерений, смоделированы площади осушаемой береговой линии ТКВ. Зависимости площади осушенной береговой линии при падении уровня воды на 2,32 м представлены на рисунке 2 для всех водоемов в виде диаграмм размаха с указанием средних и медианных значений. Ожидаемые площади осушения береговой линии находятся в диапазонах от 0,02 до 0,08 км² для водоема В-3, от 0,06 до 0,3 км² для водоема В-4, от 0,2 до 0,9 км² для водоема В-10 и от 0,5 до 2,2 км² для водоема В-11.

Оценка запасенной активности в литоральной области ТКВ

Для расчета запасенной активности использовались минимальные значения удельной активности радионуклидов в донных отложениях водоемов, так как в пределах береговой линии концентрация радионуклидов в водоеме будет меньше. Консервативная оценка запаса активности в береговой линии ТКВ проводилась для максимального значения перепада уровня воды в ТКВ – 2,32 метров (таблица 2). При падении уровня воды в водоемах ТКВ от 217,32 до 215,00 метров, ожидаемые величины запасенной активности в осушенной береговой линии составят от $1,3 \cdot 10^{11}$ Бк до $4,2 \cdot 10^{14}$ Бк для ¹³⁷Cs и от $5,7 \cdot 10^9$ Бк до $2,5 \cdot 10^{12}$ Бк для ⁹⁰Sr.

По запасенной активности ⁹⁰Sr в береговой линии водоемы ТКВ расположились в порядке убывания следующим образом: В-3 > В-4 > В-10 > В-11. По запасенной активности ¹³⁷Cs последовательность водоемов иная: В-4 > В-3 > В-11 > В-10.

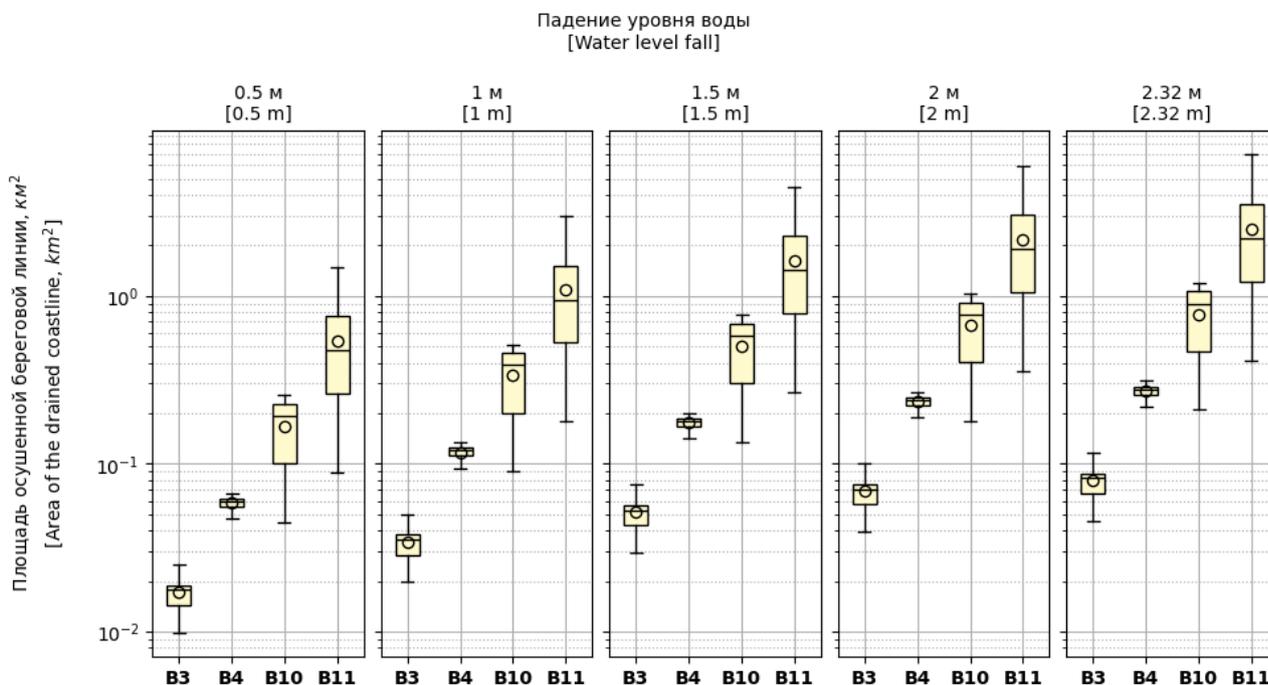


Рис. 2. Площадь осушенной береговой линии водоема В-3, В-4 и В-10, В-11 при изменении уровня воды в логарифмическом масштабе

[Fig. 2. The area of the drained coastline of the reservoir V-3, V-4 and V-10, V-11 on the water level change on logarithmic scale]

Таблица 2

Оценка запасенной активности в литоральной области водоемов ТКВ

[Table 2

Cumulative activity assessment in TRC littoral zone]

Водоем [Reservoir]	Площадь водоема, км ² [Overall reservoir area, km ²]	Длина береговой линии, м [Coastline length, m]	Осушенная площадь*, км ² [Drained coastline area, km ²]	Запасенная активность осушенной площади, Бк [Cumulative activity in drained coastline, Bq]	
				⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
В-3 [V-3]	0,5	$6,2 \cdot 10^3$	0,08	$2,5 \cdot 10^{12}$	$3,7 \cdot 10^{13}$
В-4 [V-4]	1,3	$1,5 \cdot 10^4$	0,3	$8,3 \cdot 10^{11}$	$4,2 \cdot 10^{14}$
В-10 [V-10]	19,0	$6,4 \cdot 10^4$	0,9	$4,4 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{11}$
В-11[V-11]	44,0	$1,3 \cdot 10^5$	2,2	$5,7 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^{12}$

*Медианное значение [The median value]

Поступление активности в атмосферу

Результаты расчета поднявшейся активности от ветровых нагрузок продолжительностью 3600 секунд и 60 секунд, а также оценка вероятности превышения заданной скорости ветра представлены в таблице 3. Оценка вероятности превышения заданной скорости ветра определялась как частота появления данного события в год с использованием данных о скоростях ветра метеостанции Аргаяш с 2006 по 2023 год.

Эффективная доза для населения от разового ветрового подъема активности осушенной береговой линии ТКВ

В оценке возможного радиационного воздействия на население при эксплуатации ТКВ рассматривался сценарий нарушения нормальной эксплуатации в результате

ветрового переноса радиоактивных веществ с береговой линии. Под таким сценарием понимается реализация засушливой погоды, которая способствует понижению уровня водоема, в сочетании с высокими значениями скорости ветра. Поступление активности в атмосферный воздух и вклад в дозу от каждого единичного элемента береговой линии площадью 22,5 тыс. м² оценивались отдельно. При расчетах эффективных доз исходным параметром являлось значение поднявшейся активности при экстремальных ветровых нагрузках со скоростью ветра 5 м/с и 20 м/с (см. таблицу 3). Полученные оценки эффективных доз облучения населения ближайших населенных пунктов за счет ветрового переноса радиоактивных веществ с береговой линии ТКВ с продолжительностью ветровой нагрузки 3600 с представлены в таблице 4.

Таблица 3

Величина поднятой активности в зависимости от скорости ветра

[Table 3

Removed activity values dependence of wind speed]

Скорость ветра, м/с [Wind speed, m/s]	Активность, выброса, Бк [Activity released into the atmospheric air, Bq]		Вероятность превышения ветра заданной скорости [Wind speed limit exceedance probability]
	t = 3600 сек. [t = 3600 s]	t = 60 сек. [t = 60 s]	
5	$3,7 \cdot 10^8$	$6,1 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^{-2}$
10	$2,7 \cdot 10^{11}$	$4,6 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-4}$
15	$7,0 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{-5}$
20	$8,5 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{-5}$

Таблица 4

Результаты расчета эффективных доз облучения населения ближайших населенных пунктов за первые 10 суток и первый год после разового выброса

[Table 4

Results of calculation of effective doses to the population of the nearest settlements for 10 days after incident and 1 year after incident]

Населенный пункт [Settlement]	Эффективная доза от разового выброса, мкЗв [Effective dose from single release, μSv]			
	Первые 10 суток [First 10 days after release]		Первый год [First year after release]	
	Скорость ветра 20 м/с [Wind speed 20 m/s]	Скорость ветра 5 м/с [Wind speed 5 m/s]	Скорость ветра 20 м/с [Wind speed 20 m/s]	Скорость ветра 5 м/с [Wind speed 5 m/s]
Метлино [Metlino]	3,9	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^{-1}$
Озерск [Ozersk]	2,9	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^{-1}$
Худайбердинский [Khudayberdinskiy]	2,7	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
Новогорный [Novogornyy]	2,7	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
Ибрагимова, Башакуль [Ibragimova, Bashakul ']	2,2	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
Новая Теча [Novaya Techa]	3,1	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^{-1}$
Большой Куяш, [Bol 'shoy Kuyash]	2,3	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
Татыш [Tatysh]	2,3	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
Касли [Kasli]	2,1	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
Кыштым [Kyshtym]	1,9	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^{-1}$

Для с. Метлино представлены гистограммы вкладов значений эффективных доз облучения населения, формируемых в результате поступления радионуклидов от ингаляции и с продуктами питания, внешнего облучения от облака и поверхности почвы от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr (рисунк 3), а также гистограммы вкладов в суммарное значение эффективной дозы от береговой линии водоемов (рисунк 4) при скорости ветра 20 м/с.

Для консервативной оценки вероятности прогнозируемых эффективных доз при возникновении разового загрязнения атмосферы ^{137}Cs и ^{90}Sr , при ветровом переносе радиоактивных веществ с береговой линии ТКВ, были использованы:

- арифметическое среднее значений вероятности реализации засушливости, полученных на основе данных из таблицы 1;
- значения вероятности превышения заданной скорости ветра из таблицы 3.

При условии взаимной независимости этих событий (реализации засушливости и превышения скорости ветра заданной скорости) вероятность их совместного появления равна произведению вероятностей каждого из них в отдельности. Таким образом, вероятность реализации засушливости совместно с появлением ветра со скоростью 20 м/с составляет $6,8 \cdot 10^{-7}$ в год, а с появлением ветра со скоростью 5 м/с – $2,1 \cdot 10^{-3}$ в год.

Численные значения индикаторов безопасности состояния береговой линии ТКВ

Оценка площади осушенной поверхности водоемов производилась умножением ширины осушения на длину береговой линии каждого водоема (см. таблицу 2). Расчеты годовой эффективной дозы при различной ширине осушения береговой линии и разового выброса ^{137}Cs и ^{90}Sr показали:

- ветер скоростью 5 м/с не сформирует такое загрязнение атмосферного воздуха и территории ближайших к ТКВ населенных пунктов, которое приводит к облучению населения дозой 1 мЗв даже при полном пересыхании всех водоемов;
- при скорости ветра 20 м/с достаточно осушения поверхности береговой линии шириной 22 м у каждого водоема ТКВ для формирования облучения населения ближайшего поселения (п. Метлино) величиной 1 мЗв.

Оценка возможной ширины осушения береговой линии показала, что для достижения в течение года облучения населения дозой 100 мкЗв от разового ветрового подъема требуется:

- для скорости ветра 5 м/с – полное высыхание водоемов В-3 и В-4, а ширина осушения береговой линии В-10 и В-11 должна быть не менее 1800 м;
- для скорости ветра 20 м/с достаточно 2 м ширины осушенной береговой линии.

Облучение дозой 100 мкЗв за первые 10 дней после разового ветрового подъема возможно при осушении береговой линии водоемов шириной не менее 370 и скорости ветра не менее 20 м/с.

В качестве скрининговой оценки потенциального радиационного воздействия на проживающее вблизи ТКВ насе-

ление могут применяться парные индикаторы – скорость ветра и ширина осушения береговой линии водоемов:

- ширина осушения 2 м, скорость ветра не менее 20 м/с – будет сигнализировать о возможности облучения населения дозой 100 мкЗв за год;
- ширина осушения 22 м, скорость ветра не менее 20 м/с – будет сигнализировать о возможности облучения населения дозой 1 мЗв за год;
- ширина осушения 370 м, скорость ветра не менее 20 м/с – будет сигнализировать о возможности облучения населения дозой 1 мЗв за первые 10 дней;
- полное осушение В-3 и В-4, ширина осушения В-10 и В-11 1800 м, скорость ветра 5 м/с – будет сигнализировать о возможности облучения населения дозой 100 мкЗв за год.

В случае одновременного достижения или превышения представленных парных индикаторов потребуется подтверждение по данным мониторинга отсутствия загрязнения атмосферного воздуха и территории населенных пунктов, способных сформировать облучение выше 100 мкЗв и 1 мЗв в год.

Заключение

В рассмотренном сценарии падения уровня водоемов ТКВ на 2,32 м. максимальное значение площади осушенной береговой линии может составлять 3,5 км². Запас активности ^{137}Cs и ^{90}Sr для максимального значения площади осушенной береговой линии составляет более 10^{14} Бк и 10^{12} Бк соответственно.

Согласно теории ветровой эрозии почв, при скорости ветра 5 м/с продолжительностью 3600 секунд величина поднятой активности ^{137}Cs и ^{90}Sr может достигать $3,7 \cdot 10^8$ Бк, при скорости ветра 20 м/с – $8,5 \cdot 10^{11}$ Бк. Вероятность события, связанного с переносом указанной для малых ветровых нагрузок (5 м/с) активности, составляет $2,1 \cdot 10^{-3}$ в год. В этом случае максимальная эффективная доза для населения ближайших населенных пунктов за первые 10 суток и за первый год после разового выброса ^{137}Cs и ^{90}Sr не превышает 10^{-3} мкЗв и 10^{-1} мкЗв соответственно. По наблюдениям на метеостанции в с. Аргаяш с 2006 года скорость ветра 5 м/с реализуется в 6,6% случаях.

При экстремальных ветровых нагрузках (20 м/с) подъем активности ^{137}Cs и ^{90}Sr с вероятностью $6,8 \cdot 10^{-7}$ в год формирует облучение населения за первые 10 суток и за первый год после разового выброса на уровне 1 мкЗв и 200 мкЗв соответственно. Основной вклад в эффективную дозу будет формироваться за счет ветрового подъема активности с осушенной поверхности береговые линии водоемов В-3 и В-4, так как содержание радиоактивных веществ в донных отложениях этих водоемов значительно выше, чем в В-10 и В-11. Для ^{137}Cs основным источником поступления является водоем В-4 (более 80%), для ^{90}Sr – водоем В-3 (более 75%). За первые 10 суток после разового выброса основной путь облучения населения для ^{137}Cs – от поверхности почвы, для ^{90}Sr – ингаляционное поступление. За первый год после разового выброса для обоих радионуклидов – облучение при поступлении с продуктами питания.

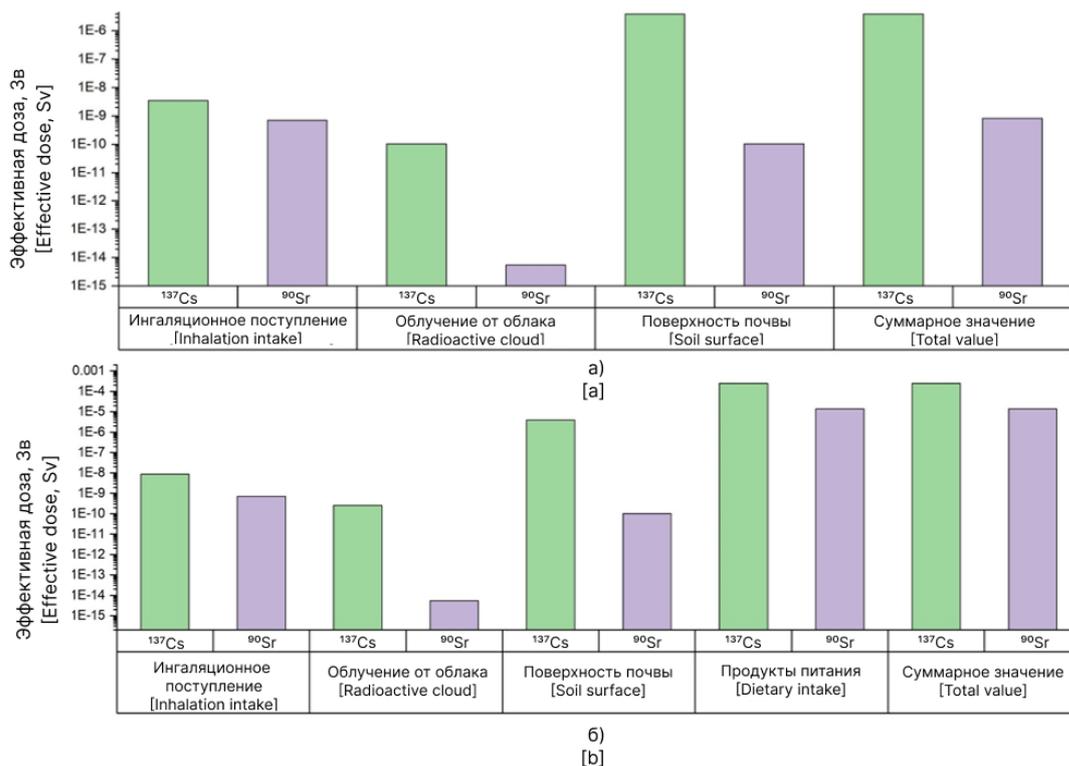


Рис. 3. Эффективные дозы для жителей с. Метлино за первые 10 суток (а) и за первый год (б) после разового выброса

[Fig. 3. Effective doses for villagers of Metlino for first the first 10 days (a) and first year (b) after single release]

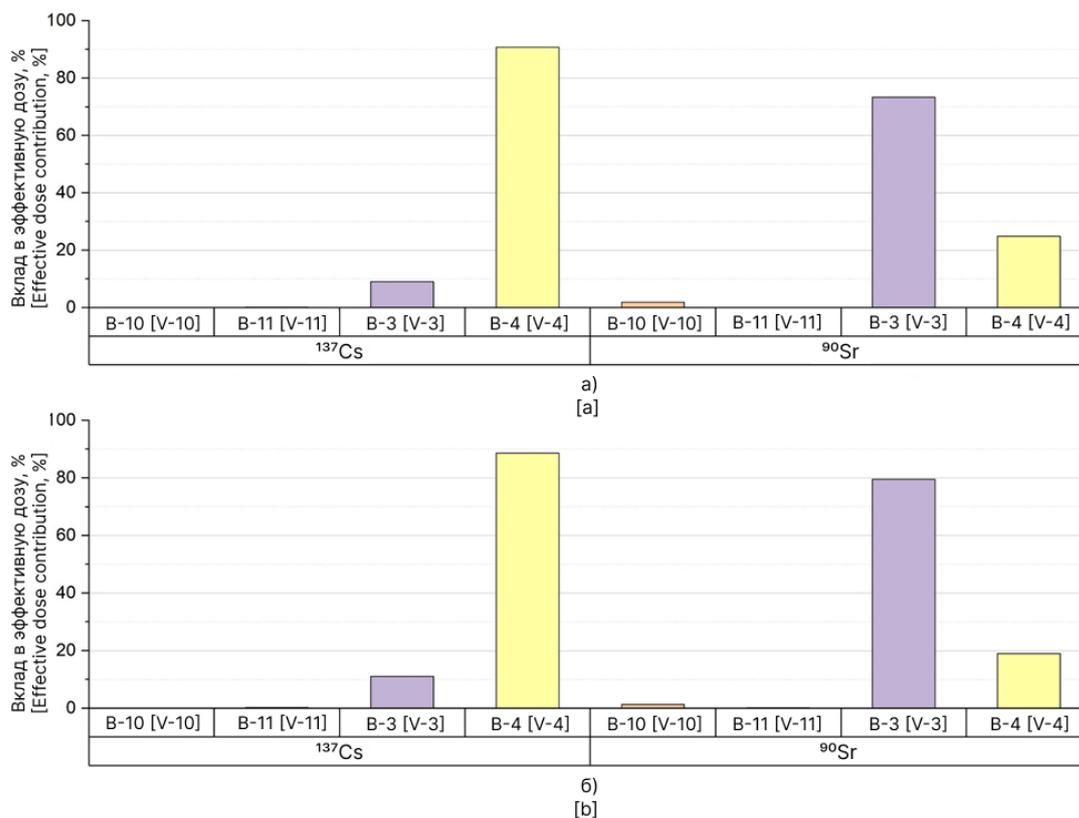


Рис. 4. Вклад водоемов в формирование эффективных доз для жителей с. Метлино за первые 10 суток (а) и за первый год (б) после разового выброса

[Fig. 4. Reservoirs contribution to the effective dose value for villagers of Metlino for the first 10 days (a) and first year (b) after single release]

Таким образом, наибольшие значения эффективной дозы для населения ближайших населенных пунктов, составляющие 1-3 мкЗв за первые 10 суток и более 200 мкЗв за первый год, достигаются при экстремальных ветровых нагрузках со скоростью ветра 20 м/с и более. Для скрининговой оценки потенциального радиационного воздействия на проживающее вблизи ТКВ население в результате разового ветрового подъёма ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr определены значения парных индикаторов – скорость ветра и ширина осушения береговой линии. Достижение или превышение значений парных индикаторов потребует подтверждения отсутствия загрязнения атмосферного воздуха и территории населённых пунктов, способных сформировать облучение выше допустимых уровней 100 мкЗв и 1 мЗв в год.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Пыхова А.В. провела поиск и анализ литературных данных, определила цели и задачи, выполнила расчет эффективных доз, написала черновик рукописи и предоставила окончательный вариант рукописи в журнал.

Екидин А.А. осуществлял общее научное руководство исследованием, отредактировал промежуточный вариант рукописи, утвердил окончательный вариант рукописи для публикации.

Васянович М.Е. внес существенный вклад в разработку концепции исследования, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Антонов К.Л. внес существенный вклад в анализ и интерпретацию данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

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

Литература

1. Линге И.И., Мокров Ю.Г., Уткин С.С. и др. Теченский каскад водоемов ФГУП «ПО «Маяк»: текущее состояние и перспективы // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 1 (61). С. 5-14.
2. Мокров Ю.Г. Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча: дисс. ... д-ра техн. наук. Озерск, 2005. 297 с.
3. Мокров Ю.Г. Радиоактивное загрязнение прибрежных участков в результате уноса водного аэрозоля с акватории реки Течи // Вопросы радиационной безопасности. 2023. № 4 (112). С. 69-81.
4. Екидин А.А., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Назарович А.В. Формирование загрязнения тритием атмосферного воздуха над акваториями промышленных водоемов // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 103-113. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-103-113.
5. Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 88-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96.
6. Мызникова О.Г., Панченко С.В., Уткин С.С. Оценка опасности ветрового выноса радиоактивных веществ с береговой линии промышленных водоемов ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 2 (62). С. 56-66.
7. Шарафутдинов Р.Б., Кузнецов Л.А., Богданова Т.Ю. Использование систем индикаторов безопасности зарубежными органами регулирования ядерной и радиационной безопасности // Ядерная и радиационная безопасность. 2008. № 2 (48). С. 3-9.
8. IAEA Nuclear Safety and Security Glossary. Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection

and emergency preparedness and response. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. 248 p.

9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2024. 104 с.
10. Тетерин А.Ф. Смерчи в Челябинской области и в районе размещения ФГУП «Производственное объединение «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 3 (83). С. 25-35.
11. Александрович И.П., Маркелов Ю.И., Тетерин А.Ф. Оценка мезоклиматических условий региона Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения степени их влияния на дефляцию радионуклидов // Экология урбанизированных территорий. 2009. № 2. С. 39-42.
12. Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Мониторинг – основа обеспечения безопасности при выполнении работ по консервации водоема Карачай // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 60-68.
13. Семенов А.И., Дубровская Л.Л. Некоторые аспекты организация надзора за техногенными источниками ионизирующего излучения в Челябинской области // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 2. С. 48-51.
14. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблем реабилитации Уральского региона / под ред. С.К.Шойгу. М.: Издательство «Комтехпринт», 2002. 287 с.
15. Зигангиров А.Р., Макеева Е.С., Екидин А.А. Радиационное воздействие на территориях с повышенным содержанием цезия-137 в почве // АНРИ. 2023. № 4 (115). С. 51-63. DOI: 10.37414/2075-1338-2023-115-4-51-63.
16. Уткин С.С. О роли Теченского каскада водоемов в долгосрочном прогнозе радиоактивного загрязнения реки Течи // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 36-42. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-36-42.
17. Официальный сайт Федерального Государственного Унитарного Предприятия «Производственное Объединение «Маяк». Отчет по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк» за 2020 год. URL: https://www.pomayak.ru/local/ОТЧЕТ_2020.pdf (Дата обращения 23.12.2021).
18. Садовников В.И., Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г. и др. Современное состояние и пути решения проблем Теченского каскада водоемов // Вопросы радиационной безопасности. 2002. № 1 (26). С. 3-14.
19. Рерих В.И., Каргаполов В.С. Радиоэкологическая характеристика левобережного и правобережного каналов Теченского каскада водоемов ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2002. № 3 (28). С. 61-66.
20. Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Деятельность ФГУП «ПО «Маяк» по обеспечению безопасной эксплуатации Теченского каскада водоемов // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 4 (92). С. 13-28.
21. Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г. Изучение параметров источника генерации водного аэрозоля с акватории водоема Карачай // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 1 (81). С. 20-29.
22. Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г. Изучение загрязнения атмосферы вблизи водоема Карачай в результате ветрового уноса водного аэрозоля с его поверхности // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 1 (85). С. 67-79.
23. Стукалов П.М. Радиоактивное загрязнение промышленного водоема ПО «Маяк» Старое Болото: обзор результатов исследовательских работ (1949-2006 годы). Озерск: Ред.-изд. центр ВРБ, 2007. 20 с.
24. Официальный сайт Всемирной Метеорологической Организации. Справочник по показателям и индексам засушливости. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3192 (Дата обращения 18.08.2023).
25. Сайт компании ООО «Расписание Погоды». URL: <https://rp5.ru> (Дата обращения 25.08.2023).

Поступила: 25.09.2023

Пыхова Александра Владимировна – аспирант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Адрес для переписки: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; E-mail: a.v.nazarovich@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8738-6054

Екидин Алексей Акимович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0002-1204-5949

Васянович Максим Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0002-2277-4512

Антонов Константин Леонидович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0001-6583-9358

Для цитирования: Пыхова А.В., Екидин А.А., Васянович М.Е., Антонов К.Л. Анализ безопасности при ветровом подъеме радиоактивных веществ с береговой линии Теченского каскада водоемов // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 114–124. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-114-124.

Safety analysis of wind-induced resuspension of radioactive materials from the Techensky reservoir cascade coastline

Aleksandra V. Pykhova¹, Aleksey A. Ekidin², Maksim E. Vasyanovich², Konstantin L. Antonov²

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

The paper provides an assessment of the probability and consequences of external events capable of leading to an incident with a breach of established safety barriers restricting the spread of radioactive substances along the coastline of the Techensky reservoir cascade. The initiating events for such an incident could be adverse meteorological conditions resulting in a decrease in the water level in the cascade water bodies below the specified design levels. Drying out the surface of previously inundated sections of the coastline will create an extensive source of atmospheric contamination by technogenic radionuclides during wind-induced resuspension. The probable area of the dried-out sections will be 0.02 – 0.08 kmI for reservoir V-3, 0.06 – 0.28 kmI for reservoir V-4, 0.19 – 0.90 kmI for reservoir V-10, and 0.47 – 2.19 kmI for reservoir V-11. The cumulative inventory of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the specified area exceeds 10⁵ Bq/ml. The activity released into the atmosphere within an hour will range from 3.69·10⁸ to 8.48·10¹¹ Bq for the wind speeds of 5 m/s and 20 m/s, respectively. The probabilities of joint occurrence of strong winds and drought conditions are 6.8·10⁷ per year for a wind speed of 20 m/s and 2.1·10³ per year for a wind speed of 5 m/s. The highest values of effective dose for the population of the nearest settlements, reaching 1–3 μSv in the first 10 days and over 200 μSv in the first year, are achieved under extreme wind loads with wind speeds of 20 m/s or more.

Key words: Techensky reservoir cascade, technogenic radionuclides, wind-induced resuspension, atmospheric air, transport model, effective dose, safety indicators.

Authors' personal contribution

Pykhova A.V. – search and analysis of literature data, defining goals and objectives, calculating effective doses, writing a draft of the manuscript and submitting the final version of the manuscript to the journal.

Ekidin A.A. – carrying out the general scientific management of the research, editing the intermediate version of the manuscript, approving the final version of the article for publication.

Vasyanovich M.E. – making significant contribution to the development of the research concept, editing the intermediate version of the manuscript.

Antonov K.L. – making significant contribution to the analysis and interpretation of the data, editing the intermediate version of the manuscript.

Conflict of interests

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

Aleksandra V. Pykhova

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin

Адрес для переписки: Mira Str., 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; E mail: a.v.nazarovich@mail.ru

References

- Linge II, Mokrov YuG, Utkin SS, Baranov SV, Batorshin GSh, Glinskii ML, et al. Techensky reservoir cascade of FGUP «PO «Mayak»: current condition and avenue. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2011;1: 5-14. (In Russian).
- Mokrov YuG. Techa the river radioactive contamination remodelment and prediction: diss. doctor of engineering science. Ozersk. 2005; 297 p. (In Russian).
- Mokrov YuG. Radioactive contamination of coastal areas as a result of the removal of water aerosol from the water area of the river Techa. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2023;4: 69-81. (In Russian).
- Ekidin AA, Antonov KL, Vasyanovich ME, Nazarovich AV. Formation of atmospheric air pollution with tritium over the water areas of industrial reservoirs. *Radioaktivnyye Otkhody = Radioactive Wastes*. 2022;4: 103-113. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-103-113. (In Russian).
- Vostrotin VV, Yanov AYu. Assessment of the level of annual income tritium into the air from the surface of Lake Kyzyltash. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2022;4(15): 88-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96. (In Russian).
- Myznikova OG, Panchenko SV, Utkin SS. Hazard evaluation for wind removal of radioactive substances from the shoreline of industrial reservoirs "PO "Mayak". *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2011;2: 56-66. (In Russian).
- Sharafutdinov RB, Kuznetsov LA, Bogdanova TYu. The use of safety indicator systems by foreign nuclear and radiation safety regulatory authorities. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost = Nuclear and radiation safety*. 2008;2: 3-9. (In Russian).
- IAEA Nuclear Safety and Security Glossary. Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response. Vienna: IAEA; 2022. 248 p.
- A report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2023. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Moscow: Rosgidromet; 2024. 104 p. (In Russian).
- Teterin AF. Tornadoes in the Chelyabinsk region and in the area of the FGUP «PO «Mayak». *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2016;3: 25-35. (In Russian).
- Aleksandrychev IP, Markelov Yul, Teterin AF. Assessment of the mesoclimatic conditions of the East Ural radioactive contamination region and the degree of their influence on the deflation of radionuclides. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy = Ecology of urbanized territories*. 2009;2: 39-42. (In Russian).
- Mokrov YuG, Aleksakhin AI. Monitoring as a basis of ensuring safety of conservation process of the Karachai reservoir. *Radioaktivnyye Otkhody = Radioactive Wastes*. 2018;3: 60-8. (In Russian).
- Semenov AI, Dubrovskaya LL. Some aspects of organising supervision over artificial sources of ionizing radiation in Chelyabinsk region. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2012;5(2): 48-51. (In Russian).
- Consequences of man-made radiation exposure and problems of rehabilitation of the Ural region. Ed. by S.K. Shoigu. Moscow: Komtekhpriint; 2002. 287 p. (In Russian).
- Zigangirov AR, Makeeva ES, Ekidin AA. Radiation exposure in areas with a high content of caesium-137 in the soil. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy = Radiation measurement equipment and news*. 2023;4: 51-63. DOI: 10.37414/2075-1338-2023-115-4-51-63. (In Russian).
- Utkin SS. On the Techa's reservoirs cascade influence on the long-term forecast of the Techa river radioactive contamination. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2016;3(9): 36-42. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-36-42. (In Russian).
- Mayak Rosatom. Environmental Safety Report of FSUE "PO "Mayak" for 2020. Available from: https://www.pomayak.ru/local/OTCHET_2020.pdf [Accessed: 23.12.2021]. (In Russian).
- Sadovnikov VI, Glagolenko YuV, Drozhko YeG, Mokrov YuG, Stukalov PM. The current state of the Techensky reservoirs cascade and ways to solve its' problems. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2002;1: 3-14. (In Russian).
- Rerikh VI, Kargapolov VS. Radioecological characteristics of the left-bank and right-bank channels of the Techensky reservoirs cascade of "PO "Mayak". *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2002;3: 61-6. (In Russian).
- Mokrov YuG, Aleksakhin AI. The activities of FSUE "PO "Mayak" for the safe operation of the Techensky reservoirs cascade ensurance. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2018;4: 13-28. (In Russian).
- Mokrov KYu, Mokrov YuG. Research on parameters of the source of water aerosol generation from the water area of the Karachai reservoir. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2016;1: 20-9. (In Russian).
- Mokrov KYu, Mokrov YuG. Research of atmospheric pollution near the Karachai reservoir as a result of wind uplift of water aerosol from its surface. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2017;1: 67-79. (In Russian).
- Stukalov PM. Radioactive contamination of an industrial reservoir named Staroye Boloto by FSUE "PO "Mayak": review of research results (1949-2006). Ozersk: Tsentr VRB; 2007. 20 p. (In Russian).
- World Meteorological Office. Handbook of indicators and indices of aridity. Available from: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3192 [Accessed: 18.08.2023]. (In Russian).
- OOO «Weather Schedule». Available from: <https://rp5.ru>. [Accessed: 25.08.2023]. (In Russian).

Received: September 25, 2023

For correspondence: Aleksandra V. Pykhova – post-graduate student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin (Mira Str., 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; E-mail: a.v.nazarovich@mail.ru)

ORCID: 0000-0001-8738-6054

Aleksey A. Ekidin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, lead research fellow, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0002-1204-5949

Maksim E. Vasyanovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research fellow, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0002-2277-4512

Konstantin L. Antonov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research fellow, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0001-6583-9358

For citation: Pykhova A.V., Ekidin A.A., Vasyanovich M.E., Antonov K.L. Safety analysis of wind resuspension of radioactive materials from the Techensky reservoir cascade coastline. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 114–124. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-114-124.

Модель профессионального облучения работников, выполняющих контроль сварных соединений

В.Ю. Голиков, С.Ю. Бажин, Е.Н. Шлеенкова, В.Ю. Богатырёва

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

Разработана модель профессионального облучения гамма-дефектоскопистов, работающих с переносными дефектоскопами в полевых условиях. Исходными данными для разработки и верификации модели служили результаты измерений характеристик поля гамма-излучения на рабочих местах дефектоскопистов и данные индивидуального дозиметрического контроля. Соотношения между измеряемыми ($H^(10)$, $H_p(10)$) и нормируемыми (эффективная доза) величинами (коэффициенты перехода) определялись с помощью расчетов и фантомных экспериментов, моделирующих три основные операции полного производственного цикла работ: транспортировка дефектоскопа к месту просвечивания изделия, установка дефектоскопа для выполнения просвечивания и операция просвечивания изделия. В результате исследования было установлено, что более 90% дозового вклада в показания индивидуального дозиметра обусловлено установкой дефектоскопа в рабочее положение и просвечиванием изделия. Значения коэффициентов перехода для этих операций в виде отношения значений эффективной дозы и показаний дозиметров ($H_p(10)$), расположенных на теле работника на уровне груди (стандартное место) и уровне живота мало отличаются для обоих положений индивидуальных дозиметров. Использование максимального значения коэффициента перехода 0,8 Зв/Зв, соответствующего операции просвечивания изделия, будет обеспечивать консерватизм оценки эффективной дозы для всего производственного цикла не более чем на 15% и 25% для дозиметров, расположенных на уровне груди и живота, соответственно.*

Ключевые слова: гамма-излучение, дефектоскопия, эффективная доза, индивидуальный эквивалент дозы.

Введение

Регулярный мониторинг индивидуального облучения работников с применением принципов обоснования, оптимизации и ограничения дозы является неотъемлемой частью любой программы радиационной защиты, представленной, как в отечественном¹, так и международном [1] законодательстве.

Рекомендации МКРЗ [2] предлагают подходы к минимизации радиационного риска путем установления системы ограничения дозы, граничных доз и референтных уровней. Основными принципами здесь являются:

- Два принципа, связанных с источниками ионизирующего излучения (ИИИ) и применимые во всех ситуациях облучения: (1) принцип обоснования - любое решение, которое изменяет ситуацию радиационного облучения должно принести больше пользы, чем вреда и (2) принцип оптимизации защиты - вероятность облучения, количество облученных лиц и значения их индивидуальных доз должны

поддерживаться на разумно достижимом низком уровне (принцип ALARA), принимая во внимание экономические и социальные факторы.

- Один принцип, применяемый к индивидууму в ситуациях планируемого облучения: принцип применения пределов дозы - общая доза любого индивидуума от источников в ситуациях планируемого облучения не должна превышать соответствующие пределы, рекомендованные МКРЗ.

Целью индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) профессионального облучения является достоверное определение доз облучения персонала для демонстрации соответствия условий труда требованиям законодательства и подтверждения того, что радиационная безопасность персонала обеспечена должным образом, а техногенный источник излучения находится под контролем. В контролируемых условиях обращения с ИИИ результатом контроля доз профессионального облучения является консервативная оценка значений нормируемых величин облу-

¹Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 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 №. 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, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

чения персонала.

Нормируемые величины, эквивалентная и эффективная дозы, служащие основой для принятия мер радиационной защиты персонала [1–3], на практике не измеряемы. Поэтому их необходимо определять на основании других измеряемых величин, называемых операционными [4–6]. При контроле полей излучения на рабочих местах персонала для оценки эффективной дозы (ЭД) используют мощность амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$, а измерения проводят в воздухе в отсутствие работника. Для контроля индивидуального облучения используют индивидуальные дозиметры, располагаемые на поверхности тела работника, а в качестве оценки ЭД – индивидуальный эквивалент дозы $H_p(10)$. Интерпретация результатов измерений $H^*(10)$ и $H_p(10)$ для оценки ЭД должна основываться на количественных соотношениях (коэффициентах перехода (КП)) между операционными и нормируемыми величинами, которые зависят от типа поля излучения, его энергетического спектра, геометрии облучения работника, а в случае индивидуального дозиметрического контроля – и места расположения дозиметра на теле.

Ранее мы оценивали значения КП расчетным путем [7]. Моделируемые условия облучения соответствовали как равномерному облучению тела работника (плоскопараллельный источник) с различных направлений (спереди, сзади и сбоку), так и резко неравномерному (точечный источник на различных расстояниях от тела) в полях фотонного излучения с энергией от 0,04 до 2 МэВ. Коэффициенты перехода рассчитывались для ряда положений индивидуального дозиметра на поверхности торса расчетной модели тела взрослого человека MIRD-5. Было продемонстрировано, что для однородных в пространстве полей излучения, направлений падения излучения спереди и сбоку (слева), т. е. с той стороны, где расположен индивидуальный дозиметр на теле работника (слева в нагрудном кармане одежды), отношение $ЭД/H_p(10)$ меньше единицы во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения. То есть, $H_p(10)$ является консервативной оценкой ЭД. При падении излучения сзади и расположении индивидуального дозиметра спереди слева в нагрудном кармане одежды во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения отношение $ЭД/H_p(10)$ существенно больше (для энергий $< 0,1$ МэВ) или близко к единице, т. е. $H_p(10)$ не является консервативной оценкой ЭД. Кроме того, на примере модели профессионального облучения персонала отделений ядерной медицины было продемонстрировано, что оптимальное (репрезентативное) расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника позволяет адекватно оценивать по его показаниям значение ЭД даже при существенно изменяющихся геометриях облучения во время полного производственного цикла обращения с источником ионизирующего излучения.

В работах [8, 9] было показано, что дефектоскописты, работающие в полевых условиях с переносными гамма-дефектоскопами, являются наиболее облучаемой группой персонала с годовыми значениями $H_p(10)$, достигающими 10 мЗв. При этом, интерпретация значений $H_p(10)$ в терминах ЭД далеко не очевидна, так как весь производственный цикл можно представить как суперпозицию трех операций (геометрий облучения), резко отличающихся по отношению к взаимному расположению ИИИ и работника, и, соответственно, имеющих различные значения КП от $H_p(10)$ к ЭД.

Так как, в конце цикла измерений мы имеем одно интегральное значение $H_p(10)$, и дозовые вклады в него от отдельных операций мы не знаем, то возникает вопрос, какое значение КП использовать для получения оценки ЭД. Использование максимального значения КП может привести к оценке ЭД, превышающей значение предела дозы, тем более при таких уровнях облучения дефектоскопистов, как было указано выше, со всеми вытекающими последствиями. Лучшим выходом из этой ситуации является построение модели профессионального облучения этой группы персонала, как и в случае персонала отделений ядерной медицины, с определением места ношения индивидуального дозиметра, где значения КП при выполнении отдельных операций полного технологического цикла будут иметь приемлемые различия.

Цель исследования - построение модели профессионального облучения работников, осуществляющих контроль сварных соединений с помощью переносных дефектоскопов с источниками гамма-излучения.

Материалы и методы

Весь технологический цикл проведения полевых гамма-дефектоскопических работ подразделяли на следующие операции, различающиеся геометрией относительного расположения работника и источника излучения [9]:

1. *Транспортировка гамма-дефектоскопа к месту проведения работ.* ИИИ расположен в радиационной головке дефектоскопа в положении хранения и, при переноске вручную к месту работы дефектоскопа, находится на уровне бедер работника сбоку спереди или сбоку сзади (см. рис. 1).

2. *Подготовка гамма-дефектоскопа к работе.* ИИИ расположен в радиационной головке дефектоскопа в положении хранения и находится на уровне живота работника спереди (см. рис. 2).

3. *Просвечивание изделия.* Перемещение работника к пульта управления, выведение ИИИ в рабочее положение из положения хранения, проведение просвечивания и возврат источника в положение хранения. В этом случае работник, в основном, облучается от удаленного источника, не находящегося в положении хранения.

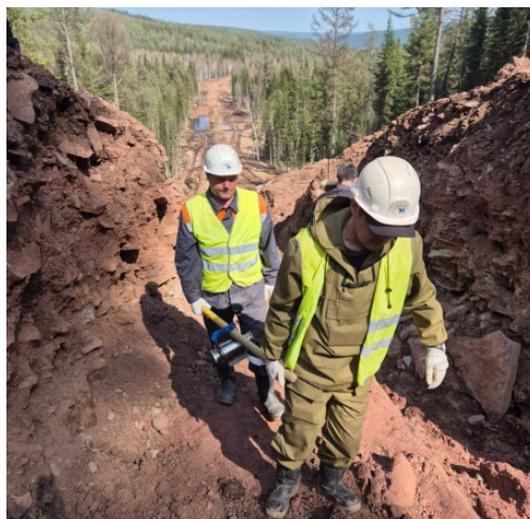


Рис. 1. Транспортировка гамма-дефектоскопа к месту проведения работ
[Fig. 1. Transportation of the gamma flaw detector to the work site]



Рис. 2. Подготовка гамма-дефектоскопа к работе
[Fig.2. Preparing the gamma flaw detector for operation]



Рис. 3. Просвечивание изделия
[Fig. 3. Radioscopy of pipes]

При построении модели профессионального облучения работников, осуществляющих контроль сварных соединений, с помощью переносных дефектоскопов с источниками гамма-излучения мы использовали результаты измерений характеристик поля гамма-излучения и индивидуальных доз у этих работников, представленных в работе [9]. В этой работе индивидуальные дозы измерялись у 15 дефектоскопистов в течение 26 дней, работавших с гамма-дефектоскопами «Гаммарид-192/120» с радионуклидным источником ^{192}Ir активностью $\sim 1,8$ ТБк на дату начала измерений. Среднее измеренное значение индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ с помощью индивидуального дозиметра, располагавшегося в стандартном месте (слева в нагрудном кармане спецодежды) за период измерений составило $0,95$ мЗв. Значение мощности амбиентной дозы $H^*(10)$ на расстоянии 10 см от поверхности радиационной головки дефектоскопа с источником в положении хранения составляло $54,3$ мкЗв/час. Измеренное значение $H^*(10)$ на расстоянии 20 м от работника при выполнении просвечивания изделия (рис. 3) составляло 15 мкЗв/час и, согласно выполненному хронометражу, операция просвечивания занимала в среднем 1 час в течение рабочего дня или $26,9$ часа за 26 дней измерений.

Значения КП от измеряемых величин $H^*(10)$ и $H_p(10)$ к значению ЭД оценивали расчетным путем с использованием компьютерной программы «РАДОФАН» [7, 10]. Эта программа позволяет вычислять как ЭД, так и отношение ЭД/ $H_p(10)$ в ряде точек, расположенных на глубине 10 мм под поверхностью торса расчетной модели MIRD-5 тела человека различного возраста [11, 12] или отношение ЭД/ $H^*(10)$ в полях фотонного излучения.

Однако, с помощью этой программы нельзя было моделировать облучение работника источником, находящимся в радиационной головке дефектоскопа в положении хранения, т.е. за защитой. Так как в этом случае спектрально угловые характеристики поля излучения могли отличаться от таковых в случае поля излучения для точечного источника без защиты, необходимо было оценить насколько эти изменения могут повлиять на значения КП от измеряемых величин $H^*(10)$ и $H_p(10)$ к значению ЭД. Эта информация

была получена с помощью фантомных экспериментов с использованием цилиндрического закрытого радионуклидного источника ^{137}Cs (диаметром 8 мм и высотой 12 мм) активностью 208 мКи, находящегося в цилиндрической защите (диаметром 150 мм и высотой 200 мм) из стали с толщиной стенок 25 мм и физического фантома Alderson Rando [13], аналогичного по своим антропометрическим характеристикам расчетной модели. Моделировались условия облучения, соответствующие подготовке дефектоскопа к просвечиванию. В этом случае источник в цилиндрической защите располагался на расстоянии 20 см от передней поверхности фантома на уровне его 22 слоя (живота). Измерения, техника выполнения которых была неоднократно описана нами ранее [14–16], выполнялись с помощью термолюминесцентных детекторов с пределом детектирования дозы ~ 20 мкГр. Погрешность определения доз не превышала $\pm 10\%$ при доверительной вероятности 95% .

Результаты и обсуждение

Результаты фантомных экспериментов представлены в таблице 1. Во второй колонке таблицы представлены значения мощностей поглощенных доз в «органах» фантома Alderson Rando, соответствующих облучению от источника ^{137}Cs активностью 208 мКи, помещенного в защиту, имитирующую головку дефектоскопа. В третьей колонке таблицы представлены значения мощностей поглощенных доз в «органах» фантома Alderson Rando, соответствующих облучению от источника ^{137}Cs без защиты с активностью $A_{\text{эфф}} = 32$ мКи (см. ниже), а в четвертой колонке - результаты расчетов мощностей средних поглощенных органов доз от источника ^{137}Cs без защиты с активностью $A_{\text{эфф}} = 32$ мКи с помощью программы «РАДОФАН» в расчетной модели MIRD-5.

Анализ этих данных показывает, что распределение поглощенных доз по телу работника в случае источника, помещенного в защитный контейнер, мало отличается от распределения, обусловленного излучением точечного источника без защиты с эффективной активностью $A_{\text{эфф}}$, расположенного на том же расстоянии от поверхности тела,

Значения мощностей поглощенных доз в «органах» фантома Alderson Rando и «органах» расчетной модели MIRD-5 при моделировании облучения от источника ¹³⁷Cs, находящегося в защите и без нее спереди на расстоянии 20 см от поверхности модели

[Table 1

Values of absorbed dose rates in the “organs” of the Alderson Rando phantom and in the “organs” of the MIRD-5 computational model when simulating irradiation from ¹³⁷Cs source in shield and without it in front at a distance of 20 cm from the model surface]

Орган/ткань [Organ/Tissue]	Мощность поглощенной дозы в органе, мГр/час [Absorbed dose rate in the organ, mGy/h]		
	В фантомном эксперименте [In phantom experiment]		Расчет (РАДОФАН) [Calculation]
	Источник в защите [Source in shield]	Источник без защиты [Source without shield]	
Красный костный мозг [Red bone marrow]	0,35	0,38	0,44
Молочная железа [Breast]	1,04	1,35	1,40
Толстая кишка [Colon]	0,68	0,69	0,64
Легкие [Lungs]	0,50	0,50	0,67
Желудок [Stomach]	1,00	1,07	1,24
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,53	0,50	0,55
Печень [Liver]	0,69	0,85	0,98
Пищевод [Oesophagus]	0,37	0,41	0,47
Щитовидная железа [Thyroid]	0,59	0,61	0,55
Поверхность кости [Bone surface]	0,35	0,38	0,38
Гонады [Gonads]	0,45	0,40	0,47
Кожа [Skin]	0,59	0,57	0,55
Остальные органы [Other]	0,59	0,58	0,64
ЭД [Effective dose]	0,59	0,62	0,72
ЭД/H _p (10), отн.ед. [E/H _p (10)]	0,45	0,44	0,52

по крайней мере, для расстояний больше 20 см. Значение A_{эфф} можно определить по формуле:

$$A_{эфф} = \frac{10 \cdot P_{100}}{\Gamma}, \text{ Ки}$$

где: P₁₀₀ – мощность поглощенной дозы в воздухе, измеренная на расстоянии 100 см от оси контейнера с источником, мГр/час; Γ - гамма-постоянная радионуклида источника (мГр см²)/(мКи час). В нашем случае: P₁₀₀ = 90 мкГр/час; Γ₁₃₇ = 28,4 (мГр см²)/(мКи час).

Наиболее интересное в контексте настоящей работы значение отношения ЭД/H_p(10) при размещении источника в защитном контейнере, согласно результатам фантомного эксперимента, практически не отличается от такового в случае источника без контейнера, что позволяет в дальнейшем использовать расчетную программу «РАДОФАН» для оценки значений КП. Кроме того, сами абсолютные расчетные значения поглощенных доз в органах в большинстве случаев не отличаются более чем на 10% от аналогичных значений, полученных в эксперименте (см. колонки 3 и 4 табл. 1), что также предполагает возможность исполь-

зования расчетных методов, вместо трудоемких фантомных экспериментов при разработке модели профессионального облучения дефектоскопистов.

Перейдем к построению модели профессионального облучения дефектоскопистов, работающих с гамма-дефектоскопами «Гаммарид-192/120» с радионуклидным источником ¹⁹²Ir.

В таблице 2 представлены расчетные значения КП от показаний индивидуальных дозиметров, расположенных на торсе расчетной модели на высотах z от земли 122 см (уровень живота) и 136 см (уровень груди), к значению эффективной дозы E_{эфф} (согласно Публикации № 60 МКРЗ). Там же представлены значения КП от дозы в воздухе на высоте 100 см от уровня земли в отсутствии фантома к значению эффективной дозы E_{эфф} (см. рис. 4).

Из данных, представленных в работе [9], следует, что операция «просвечивание» за период измерений 26 дней дает следующий вклад в показания дозиметра, расположенного на груди, 15 мкЗв/час · 26,9 часа = 0,40 мЗв. Тогда вклад в показания дозиметра на груди за время измерений от двух других операций (переноска и установка дефектоскопа в рабочее положение) составит 0,95 мЗв – 0,40 мЗв = 0,55 мЗв.

Расчетные значения КП (Зв/Зв) от измеряемых величин $H^*(10)$ и $H_p(10)$ к $E_{до}$ при моделировании облучения дефектоскопистов, работающих с переносными дефектоскопами с источником ^{192}Ir

[Table 2

Calculated values of conversion factors (Sv/Sv) from the measured values $H^*(10)$ and $H_p(10)$ to $E_{до}$ when simulating irradiation of the flaw detector operators working with portable flaw detectors with ^{192}Ir source]

Геометрия облучения [Geometry of exposure]	$E_{до}/H_p^{122}(10)$	$E_{до}/H_p^{136}(10)$	$E_{до}/H_{100}^*(10)$
	$E_{до}/H_p^{122}(10)$	$E_{до}/H_p^{136}(10)$	$E_{до}/H_{100}^*(10)$
Спереди, источник в режиме хранения, на расстоянии 20 см от поверхности тела [Front, source in storage mode, at a distance of 20 cm from the body surface]	0,40	0,50	1,0
Сбоку, источник в режиме хранения, на расстоянии 20 см от поверхности тела [On the side, source in storage mode, at a distance of 20 cm from the body surface]	1,0/15	¹⁾ 1,7/40	0,40
Спереди, источник в режиме просвечивания на расстоянии 20 м от поверхности тела [Front, source in radioscopia mode at a distance of 20 m from the body surface]	0,80	0,80	0,80

¹⁾ Цифра слева от черты соответствует ситуации переноски дефектоскопа с той же стороны, где на теле размещен индивидуальный дозиметр, а цифра справа от черты - ситуации переноски дефектоскопа с противоположной стороны

[The number to the left of the line corresponds to the situation of carrying the flaw detector on the same side where the individual dosimeter is placed on the body, and the number to the right of the line corresponds to the situation of carrying the flaw detector from the opposite side]

Оценим соотношение значений мощностей $E_{до}$, соответствующих трем условиям облучения дефектоскопистов (производственным операциям, см. табл. 2), с помощью измерений характеристик поля излучения, представленных в работе [9].

Геометрия облучения. спереди, дефектоскоп на расстоянии 20 см от поверхности тела на высоте 120 см от земли, источник в режиме хранения. Измеренное значение мощности амбиентной дозы на расстоянии 10 см от поверхности дефектоскопа или на расстоянии 15,5 см от его

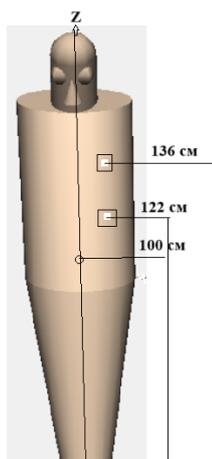


Рис. 4. Расположение индивидуальных дозиметров на теле работника и точки измерения мощности дозы в воздухе, где нормируется рассчитанное значение эффективной дозы

[Fig. 4. The location of individual dosimeters on the worker's body and the point of measuring the dose rate in the air, where the calculated value of the effective dose is normalized]

оси, где располагался источник в положении хранения составляло 54,3 мкЗв/час. Дефектоскоп располагался на высоте 120 см над землей, а его источник на расстоянии (10,0 см + 25,5 см) = 35,5 см от вертикальной оси расчетной модели. Путем несложных вычислений можно показать, что расстояние от источника до точки на высоте 100 см на вертикальной оси расчетной модели будет составлять 40,75 см. Тогда мощность амбиентной дозы в точке на высоте 100 см на вертикальной оси расчетной модели будет составлять 54,3 мкЗв/час $(15,5/40,75)^2 = 7,9$ мкЗв/час. С учетом значения КП из табл. 2 мощность $E_{до} = 7,9$ мкЗв/час $1,0 = 7,9$ мкЗв/час.

Геометрия облучения. сбоку, дефектоскоп на расстоянии 20 см от поверхности тела и на высоте 60 см от земли, источник в режиме хранения. Путем несложных вычислений можно показать, что расстояние от источника до точки на высоте 100 см на вертикальной оси расчетной модели будет составлять 60,6 см. Тогда мощность амбиентной дозы в точке на высоте 100 см на вертикальной оси расчетной модели будет составлять 54,3 мкЗв/час $(15,5/60,6)^2 = 3,6$ мкЗв/час. С учетом значения КП из табл. 2 мощность $E_{до} = 3,6$ мкЗв/час $0,4 = 1,4$ мкЗв/час.

Геометрия облучения. спереди, источник в режиме просвечивания на расстоянии 20 м от поверхности тела работника. Измеренная мощность амбиентной дозы в месте нахождения работника составляла 15,0 мкЗв/час. С учетом значения КП из табл. 2 мощность $E_{до} = 15,0$ мкЗв/час $0,8 = 12$ мкЗв/час.

Из результатов хронометража мы знаем, что время проведения операции просвечивания за рабочую смену составляло 1 час. Остальные две операции производственного цикла не хронометрировались, поэтому попытаемся грубо оценить времена, затрачиваемые на переноску и установку дефектоскопа за рабочую смену для оценки дозовых вкладов каждой из трех операций производственного цикла в показания индивидуального дозиметра. Суммарное среднее значение дозового вклада операций пере-

носки и установки дефектоскопа за рабочую смену в значении $H_p^{136}(10)$ составляло 550 мкЗв за 26 дней или 21,2 мкЗв/день. При этом вклад в значение $H_p^{136}(10)$ от операции установки дефектоскопа составлял $\Delta D_{\text{до}} / (\Delta D_{\text{до}} / H_p^{136}(10)) = 7,9 \text{ мкЗв/час} / 0,5 = 15,8 \text{ мкЗв/час}$, а переноски дефектоскопа $\Delta D_{\text{до}} / (\Delta D_{\text{до}} / H_p^{136}(10)) = 1,4 \text{ мкЗв/час} / 1,7 = 0,8 \text{ мкЗв/час}$.

Можно записать следующее уравнение с неизвестными временами выполнения этих операций x и y : $15,8 \text{ (мкЗв/час)} \cdot x \text{ (час/день)} + 0,8 \text{ (мкЗв/час)} \cdot y \text{ (час/день)} = 21,2 \text{ мкЗв/день}$. Если предположить, что время установки дефектоскопа в рабочее положение того же порядка, что и просвечивание изделия, т.е. $\sim 1 - 1,3 \text{ часа/день}$ ($3 - 4 \text{ мин/шов}$), то тогда на переноску дефектоскопа должно тратиться около 3 час/день. То есть, время, связанное с непосредственным выполнением работ производственного цикла, составляет $\sim 5 - 6 \text{ часов}$ за рабочую смену, что вполне разумно. Тогда дозовый вклад каждой операции в показания $H_p^{136}(10)$ будет составлять: просвечивание – 41%, установка дефектоскопа – 52% и переноска дефектоскопа – 7%.

Из данных, приведенных в табл. 2 следует, что значения КП в виде $\Delta D_{\text{до}} / H_p^{122}(10)$ и $\Delta D_{\text{до}} / H_p^{136}(10)$ мало отличаются для операций, обеспечивающих более 90% дозового вклада в показания дозиметра. Поэтому, во-первых, не играет большой роли место расположения дозиметра, на уровне груди или на уровне живота, и, во-вторых, можно использовать максимальное значение КП для двух основных операций производственного цикла, а именно 0,8 Зв/Зв, соответствующее операции просвечивания изделия. В этом случае консерватизм в оценке $\Delta D_{\text{до}}$ с помощью показаний дозиметров, расположенных на уровне груди или живота, не превысит 15% – 25%, соответственно.

Эти же значения КП можно применять и при работе с радионуклидами ^{60}Co , ^{137}Cs или ^{75}Se . Дополнительная погрешность не превысит 20%.

Заключение

Разработана модель профессионального облучения гамма-дефектоскопистов, работающих с переносными дефектоскопами в полевых условиях. Исходными данными для разработки и верификации модели служили результаты измерений характеристик поля гамма-излучения на рабочих местах дефектоскопистов и данные индивидуального дозиметрического контроля. Соотношения между измеряемыми ($H^*(10)$, $H_p(10)$) и нормируемыми (эффективная доза) величинами (коэффициенты перехода) определялись с помощью расчетов и фантомных экспериментов, моделирующих три основные операции полного производственного цикла работ: транспортировка дефектоскопа к месту просвечивания изделия, установка дефектоскопа для выполнения просвечивания и операция просвечивания изделия. В результате исследования было установлено, что более 90% дозового вклада в показания индивидуального дозиметра обусловлено установкой дефектоскопа в рабочее положение и просвечиванием изделия. Значения коэффициентов перехода для этих операций в виде отношения значений эффективной дозы и показаний дозиметров ($H_p(10)$), расположенных на теле работника на уровне груди (стандартное место) и уровне живота мало отличаются для обоих положений индивидуальных дозиметров. Использование максимального значения КП 0,8 Зв/Зв, соответству-

ющего операции просвечивания изделия, будет обеспечивать консерватизм оценки эффективной дозы для всего производственного цикла не более чем на 15% - 25% для дозиметров, расположенных на уровне груди или живота, соответственно.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Голиков В.Ю. осуществлял общее научное руководство исследованием, разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, выполнил анализ данных, отредактировал и предоставил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Бажин С.Ю. провел литературный поиск, выполнил измерения индивидуальных эквивалентов доз, выполнил анализ данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Шлеенкова Е.Н. выполнила измерения индивидуальных эквивалентов доз.

Богатырёва В.Ю. выполнила измерения индивидуальных эквивалентов доз.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

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. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No (2-4).
3. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Annals of the ICRP. 1990. Vol. 21, No 1-3. P. 1-201.
4. ICRU. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1988.
5. ICRU. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. 1993b.
6. ICRU. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1988.
7. Голиков В.Ю. Коэффициенты перехода от индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ к эффективной дозе в полях фотонного излучения и их использование при разработке моделей профессионального облучения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 69-76. DOI: 10.21514/1998-42.
8. Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю., Ильин В.А. Сравнение эффективных доз персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных и в нестационарных условиях // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 64-69. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-64-69.
9. Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю. Консервативная оценка доз внешнего облучения персонала при проведении радионуклидной дефектоскопии // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 76-85. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-76-85.
10. Голиков В.Ю. Метод и компьютерная программа расчета доз фотонного излучения в фантомах тела человека // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 55-65.
11. Snyder W.S., Ford M.R., Warner G.G., Watson G.G. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1974.
12. Han E.Y., Bolch W.E., Eckerman K.F. Revisions to the ORNL

- series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRDO schema // Health Physics. 2006. Vol. 90, No 4. P. 337–356.
13. Alderson S.W., Lanzl L.H., Rollins M., Spira I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans // American Journal of Roentgenology. 1962. No. 87. P. 185.
14. Golikov V.Yu., Nikitin V.V. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements // Health Physics. 1989. Vol. 56, No 1. P. 111–115.
15. Golikov V., Wallström E., Wöhni T. et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // Radiation Environmental Biophysics. 2007. Vol. 46, No 4. P. 375–382.
16. 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.

Поступила: 15.07.2024

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

Бажин Степан Юрьевич – заведующий лабораторией радиационного контроля, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-1778-4334

Шлеенкова Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0009-0006-6391-1639

Богатырёва Виктория Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0009-0003-6863-5192

Для цитирования: Голиков В.Ю., Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю. Модель профессионального облучения работников, выполняющих контроль сварных соединений // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 125–132. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-3-125-132

Model of occupational exposure of workers performing inspection of welded joints

Vladislav Yu. Golikov, Stepan Yu. Bazhin, Ekaterina N. Shleenkova, Victoria Yu. Bogatyreva

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

A model of occupational exposure to gamma flaw detector operators working with portable flaw detectors in the field has been developed. The initial data for the development and verification of the model were the results of measurements of the characteristics of the gamma radiation field at the workplaces of flaw detectors and data from individual dosimetric monitoring. The relationships between the measured ($H^(10)$, $H_p(10)$) and protection (effective dose) quantities (conversion coefficients) were determined using calculations and phantom experiments simulating three main operations of the full production cycle: transportation of the flaw detector to the place of X-raying of the product, installation of a flaw detector to perform x-raying and X-raying of the product. As a result of the study, it was found that more than 90% of the dose contribution to the readings of an individual dosimeter is due to the installation of the flaw detector in the working position and X-raying of the product. The values of the conversion coefficients for these operations in the form of the ratio of the effective dose values and the readings of dosimeters ($H_p(10)$) located on the worker's body at chest level (standard place) and abdominal level differ little for both positions of individual dosimeters. The use of maximum conversion coefficient value of 0.8 Sv/Sv corresponding to the operation of X-raying of the product will ensure conservatism in the assessment of the effective dose for the entire production cycle by no more than 15% and 25% for dosimeters located at the chest level and abdominal level, respectively.*

Key words: gamma radiation, flaw detection, effective dose, individual dose equivalent.

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

Authors' personal contribution

Golikov V.Yu. provided general scientific supervision of the study, developed the study design, defined goals and objectives, performed data analysis, edited and submitted the final version of the manuscript for publication in the journal.

Bazhin S.Yu. Conducted a literature search, performed measurements of individual dose equivalents, performed data analysis and edited an intermediate version of the manuscript.

Shleenkova E.N. performed measurements of individual dose equivalents.

Bogatyreva V.Yu. performed measurements of individual dose equivalents.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflicts of interest when conducting the study and preparing this paper.

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. ICRP 2007 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37 (2-4).
3. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP* 1990;21(1-3): 1-201.
4. ICRU. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1988
5. ICRU. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. 1993b.
6. ICRU. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1998.
7. Golikov VYu. The conversion coefficients from Hp(10) to effective dose in the fields of photon radiation and their use in the development of occupational exposure models. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 69-76 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-69-76.
8. Bazhin SYu, Shleenkova EN, Bogatyreva VYu, Ilyin VA. Comparison of effective doses for personnel performing flaw detection in stationary conditions and in situ. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 64-69 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-64-69.
9. Bazhin SYu, Shleenkova EN, Bogatyreva VYu. Conservative assessment of external radiation dose for staff in the event of radionuclide flaw detection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 76-85 (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-76-85.
10. Golikov VYu. Method and software for photon dose calculation in phantoms of human body. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 55-65 (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-55-65.
11. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Watson GG. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory; 1974.
12. Han EY, Bolch WE, Eckerman KF. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema. *Health Physics*. 2006;90(4): 337-356.
13. Alderson SW, Lanzl LH, Rollins M, Spira I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans. *American Journal of Roentgenology*. 1962;87: 185.
14. Golikov VYu, Nikitin VV. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements. *Health Physics*. 1989;56(1): 111-115.
15. Golikov V, Wallström E, Wöhni T Tanaka K, Endo S, Hoshi M. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiation Environmental Biophysics*. 2007;46(4): 375-382.
16. 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.

Received: July 15, 2024

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

Stepan Yu. Bazhin – Head of the Laboratory of Radiation Control, Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-1778-4334

Ekaterina N. Shleenkova – Junior Researcher of the Laboratory of Radiation Control, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0006-6391-1639

Victoria Yu. Bogatyreva – Junior Researcher of the Laboratory of Radiation Control, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0003-6863-5192

For citation: Golikov V.Yu., Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Bogatyreva V.Yu. Model of occupational exposure of workers performing inspection of welded joints. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3, P. 125-132. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-125-132

Анализ горимости лесов Брянской области в зонах радиоактивного загрязнения и за их пределами

А.И. Радин^{1,3}, Т.А. Марченко², А.Н. Раздайводин¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, Московская область, Пушкино, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Федеральный центр науки и высоких технологий), Москва, Россия

³ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал, Московская область, Мытищи, Россия

Целью исследования является анализ горимости лесов Брянской области с учетом их радиоактивного загрязнения и потенциальных рисков дополнительного облучения для работников лесного хозяйства, задействованных в работах по тушению лесных пожаров. Значительные площади радиоактивного загрязнения лесов с преобладанием участков, относящихся к классам высокой и очень высокой природной пожарной опасности, ограничения хозяйственной деятельности и длительный пожароопасный период являются факторами, которые способствуют возможному возникновению радиоактивных лесных пожаров. Анализ объединенных данных о лесных пожарах в радиоактивном загрязнении лесных участков показал, что большая часть лесных пожаров возникает вне зон радиоактивного загрязнения и не является радиоактивными. Наибольшее число пожаров происходит в начале пожароопасного сезона. Радиоактивные лесные пожары в большинстве случаев возникают от выжигания сухой травянистой растительности, в результате перехода пожаров с земель иных категорий и по вине населения. Средняя эффективная доза дополнительного облучения за смену может быть оценена в 1,96 мкЗв, а максимальная в ~ 15,37 мкЗв. Большинство пожаров ликвидируется на ранних стадиях и не успевают охватить большие площади, что свидетельствует об эффективной работе лесопожарной службы.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, радиоактивно загрязненная территория, радиоактивные лесные пожары, горимость лесов, преодоление последствий радиационных аварий, защита населения, безопасность жизнедеятельности населения.

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС привела к загрязнению радионуклидами больших природных территорий, в том числе лесов в 15-и субъектах Российской Федерации [1, 2]. В наибольшей степени пострадала Брянская область, где до сих пор более 200 тыс. га лесов остаются в зонах радиоактивного загрязнения с плотностью загрязнения лесных почв цезием-137 (¹³⁷Cs) свыше 37 кБк/м² (1 Ки/км²). Основная часть загрязненных лесов сосредоточена на юго-западе области – в Злынковском и Клинцовском лесничествах [3, 4]. В современных условиях основной вклад в радиоактивное загрязнение вносит ¹³⁷Cs.

По плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs леса делятся на четыре зоны¹:

- Зона низкой степени загрязнения лесов, 37-185 кБк/м²,
- Зона средней степени загрязнения лесов, 185-555 кБк/м²,
- Зона высокой степени загрязнения лесов, 555-1480 кБк/м²,
- Зона крайне высокой степени загрязнения лесов, свыше 1480 кБк/м².

Общая площадь лесов Брянской области на 01.01.2018 года составляла 1237,2 тыс. га (35,5% от общей площади области)², в том числе на землях лесного фонда - 1208,7 тыс. га (97,7 %); на землях населенных пунктов - 4,8 тыс. га (0,4%); на землях обороны и безопасности - 8,7 тыс. га (0,7%); на землях особо охраняемых природных территорий - 12,2 тыс. га (1,0%), на землях иных категорий – 2,8 тыс. га (0,2%). Фактическая лесопокрытая площадь на территории области по материалам дистанционного зон-

¹ Приказ Минприроды России от 08.06.2017 № 283 "Об утверждении Особенности осуществления профилактических и реабилитационных мероприятий в зонах радиоактивного загрязнения лесов". (Зарегистрировано в Минюсте России 18.08.2017 № 47860) [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 08.06.2017 No. 283 "On approval of the Specifics of preventive and rehabilitation measures in areas of radioactive contamination of forests" (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 18.08.2017 No. 47860) (In Russ.)]

² Лесной план Брянской области на период 2019-2028 гг., утв. указом Губернатора Брянской области от 18 декабря 2018 № 288 [Forest plan of the Bryansk region for 2019-2028, approved by the decree of the Governor of the Bryansk region dated December 18, 2018, No. 288 (In Russ.)]

Радин Александр Игоревич

Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства

Адрес для переписки: 141200, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15; E-mail: Radin@roslesrad.ru

дирования Земли составляет 1852,4 тыс. га (55,75 %) [5]. Она включает неучтенные леса на землях запаса и землях, выведенных из сельхозпользования [6].

Ландшафтные пожары, в том числе лесные, в зонах радиоактивного загрязнения могут создавать как непосредственную опасность дополнительного облучения, так и повышать социально-психологическую напряженность жителей пострадавших территорий.

Пожарная опасность лесов зависит от степени природной пожарной опасности, погодных условий в пожароопасный сезон, вида и количества источников загорания, противопожарного обустройства лесов. Реализованной пожарной опасностью лесной территории является её фактическая горимость, которая является объективной основой шкалы пожарной опасности лесов [7].

Показателями горимости лесов для исследуемой территории служат частота возникновения пожаров, средняя площадь одного пожара и доля площади лесного фонда, пройденная огнем.

Природная пожарная опасность характеризуется пятью классами по сочетанию объектов загорания (характерные типы леса, вырубок, лесных насаждений и безлесных пространств) и наиболее вероятным видам пожаров, условиями и продолжительностью периода их возможного возникновения и распространения. К первому классу относят леса с очень высокой природной опасностью, к пятому – леса, для которых природная пожарная опасность отсутствует³. Леса Брянской области имеют высокий класс природной пожарной опасности, преобладают леса 1-4 класса (таблица 1). Средний класс природной пожарной опасности по региону составляет 2,9⁴.

Таблица 1

Распределение лесов Брянской области по классам пожарной опасности, %

[Table 1

Distribution of forests of the Bryansk region by fire hazard classes, %]

Класс природной пожарной опасности [Natural fire hazard class]	I	II	III	IV	V
Доля лесов, % [Percentage of forests]	16,1	14,5	33,8	33,2	2,4

³Приказ федерального агентства лесного хозяйства от 05.07.2011 № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды» [Order No. 287 of the Federal Forestry Agency dated July 5, 2011 "On Approval of the Classification of natural fire danger of forests and classification of fire danger in forests depending on weather conditions" (In Russ.)]

⁴Лесной план Брянской области на период 2019-2028 гг., утв. указом Губернатора Брянской области от 18.12.2018 № 288 [Forest plan of the Bryansk region for 2019-2028, approved by the decree of the Governor of the Bryansk region dated December 18, 2018, No. 288 (In Russ.)]

⁵Руководство по радиационному обследованию лесов (на период 1992-1995 гг.) . М., 1992. 22 с. (утв. заместителем Председателя Комитета по лесу Министерства экологии и природных ресурсов Российской Федерации Б.Д. Отставновым 29.05.1992) [Guidelines for the radiation survey of forests (for the period 1992-1995) . Moscow; 1992. 22 p. (approved by the Deputy Chairman of the Committee on Forests of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Russian Federation B.D. Otstavnov on 05/29/1992) (In Russ.)]

⁶Руководство по радиационному обследованию лесного фонда (утв. Приказом Рослесхоза от 29.12.1995 № 195); Методические рекомендации по регламентации лесохозяйственных мероприятий в лесах, загрязнённых радионуклидами (утв. Приказом Рослесхоза от 16.03.2009 № 81) [Guidelines for the radiation survey of the forest fund (approved by the Order of the Federal Forestry Agency dated 12/29/1995 No. 195); Methodological recommendations for the regulation of forestry activities in forests contaminated with radionuclides (approved by the Order of the Federal Forestry Agency dated 03/16/2009 N 81) (In Russ.)]

⁷Методические рекомендации по регламентации лесохозяйственных мероприятий в лесах, загрязнённых радионуклидами (утв. Приказом Рослесхоза от 16.03.2009 № 81) [Methodological recommendations on the regulation of forestry activities in forests contaminated with radionuclides (approved by the Order of the Federal Forestry Agency dated 03/16/2009 No. 81) (In Russ.)]

Значительные площади радиоактивного загрязнения лесов с преобладанием участков, относящихся к классам высокой и очень высокой природной пожарной опасности, ограничения хозяйственной деятельности и длительный пожароопасный период способствуют возможному возникновению радиоактивных лесных пожаров.

Цель исследования – на основе результатов многолетнего радиационного мониторинга лесов и накопленных результатов научно-исследовательских и практических работ проанализировать горимость лесов Брянской области с учетом их радиоактивного загрязнения и потенциальных рисков для здоровья работников лесного хозяйства, задействованных в работах по тушению и профилактике лесных пожаров.

Задачи исследования

1. Провести анализ динамики (количества и площади) радиоактивных лесных пожаров в Брянской области за период 2015-2023 гг. с учётом их радиоактивного загрязнения.
2. Проанализировать причины возникновения пожаров, в том числе в зонах радиоактивного загрязнения.
3. Оценить дозы дополнительного облучения для работников лесного хозяйства, задействованных в работах по тушению и профилактике лесных пожаров.

Материалы и методы

Для оценки радиоактивного загрязнения лесов Брянской области были использованы данные радиационных обследований, проведенных подведомственными организациями Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз) в период с 1991 г. из архива отдела радиационной экологии и экотоксикологии Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ) и результаты поквартирного обследования 2019-2022 гг.

Пробы для определения плотности загрязнения ¹³⁷Cs лесных почв отбирались по принятой в лесном хозяйстве методике^{5,6,7} с использованием почвенного пробоотборника фиксированным диаметром 0,04 м на глубину 0,15 м с учетом лесной подстилки. В каждом квартале отбиралась объединенная проба из пяти точечных проб по схеме «конверт». Определение удельной активности ¹³⁷Cs проводилось в воздушно-сухих пробах. В начальный период обследования использовались различные средства измерений, пре-

имущественно радиометры РУБ-01П различных модификаций с блоком детектирования БДКГ-03П и полупроводниковые гамма-спектрометры⁸. С 2007 года в лабораториях радиационного контроля Рослесхоза стали использовать единое программно-аппаратное гамма-спектрометрическое оснащение на основе комплексов УСК Гамма-плюс с ПО «Прогресс»⁹. В 2019-2022 гг. измерения проводились в лаборатории радиационного контроля ФБУ ВНИИЛМ на гамма-спектрометрах Гамма-1П с детекторами из особо-чистого германия с программным обеспечением «SpectraLine BG»¹⁰.

Для анализа горимости были использованы статистические данные о пожарах Управления лесами Брянской области и Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) за период с 2015 по 2023 гг. Для анализа использовались сведения о количестве лесных пожаров, площади лесного фонда, пройденного пожарами, причинах возгорания, затраченном времени и количестве работников лесного хозяйства, задействованных при тушении.

Сведения о лесных пожарах были объединены в базе данных с информацией о радиоактивном загрязнении лесных участков, актуализированной на даты пожаров. Для участков, пройденных повторными обследованиями, плотность загрязнения определялась как среднее актуализированных значений.

Для оценки доз дополнительного облучения работников использовалось расчетное значение нормированной мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения (формула (1)), полученное на основе данных радиационного обследования лесов Брянской области за период 2019-2022 гг. [8]:

$$MДy = 1,46 \cdot 10^{-3}(\text{мкЗв/ч})/(\text{кБк/м}^2), \quad (1)$$

На основании имеющейся информации о плотности загрязнения лесных участков (кварталов), пройденных лесными пожарами, рассчитывалась МАЭД на дату пожара (формула (2)):

$$МАЭД = A_{\text{Cs-акт}} \cdot MДy, \quad (2)$$

где: $A_{\text{Cs-акт}}$ – плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , актуализированная на дату пожара, кБк/м^2 .

На основе полученных значений МАЭД рассчитывалась эффективная доза дополнительного облучения при тушении пожара (E) (формула (3)):

$$E = МАЭД \cdot K \cdot t, \quad (3)$$

где: K – коэффициент перехода от МАЭД к E, взято по литературным данным для лесных участков - 0,57 [9]. Следует отметить, что на данный коэффициент может оказывать влияние состав и структура насаждения, однако в настоящее время этот вопрос изучен недостаточно.

t – продолжительность тушения пожара, ч.

Результаты и обсуждение

Согласно действующему лесопожарному зонированию земель лесного фонда, территория Брянской области относится к зоне наземного обнаружения и тушения лесных пожаров¹¹. Обнаружение пожаров происходит преимущественно при наземном патрулировании и видеомониторинге (более 30% обнаруженных пожаров). Активное внедрение беспилотных летательных аппаратов позволяет прогнозировать увеличение их вклада в обнаружение пожаров [10]. В тушении пожаров задействуются силы и средства Лесопожарной службы Брянского управления лесами с привлечением арендаторов (на арендованных лесных участках).

На сегодняшний день большая часть лесных пожаров возникает вне зон радиоактивного загрязнения и не является радиоактивными (рис. 1, 2). При общей площади лесного фонда в 1237,2 тыс. га в зонах загрязнения по состоянию на 2023 г. находится 226,9 тыс. га, т.е. ~ 18,5 % площади. За рассматриваемый период в зонах загрязнения зарегистрировано ~ 14 % от всех произошедших пожаров. Доля площади, пройденной пожарами в зонах радиоактивного загрязнения, составила 24,8% от общей. За период с 2015 по 2023 гг. частота пожаров по региону составила 3,9 шт./100 тыс. га, в том числе в зонах радиоактивного загрязнения – 2,9 шт./100 тыс. га, относительная площадь пожаров, соответственно – 30,0 га/100 тыс. га и 40,6 га/100 тыс. га.

Увеличение относительной площади пожаров в зонах радиоактивного загрязнения обусловлено одним крупным пожаром, произошедшим 12–14 апреля 2015 г. в Клинецком лесничестве в зоне низкой степени загрязнения лесов, частично захватившим участки в зоне средней степени загрязнения. Площадь этого пожара составила 595,7 га.

⁸ Методика выполнения гамма-спектрометрических измерений активности радионуклидов в пробах почвы и растительных материалов. М., 1994, 16 с. (утверждена приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 05.09.1994 № 192, Свидетельство о метрологической аттестации № 73/94) [The methodology for performing gamma-spectrometric measurements of the activity of radionuclides in soil samples and plant materials. Moscow; 1994. 16 p. (approved by Order No. 192 of the Federal Forestry Service of Russia dated September 5, 1994, Certificate of Metrological Certification No. 73/94) (In Russ.)]

⁹ Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». Свидетельство об аттестации МВИ № 40090.3Н700 от 22.12.2003 МИ 2491-98 Методика выполнения измерений. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесине, отпущаемой на корню [A method for measuring the activity of radionuclides using a scintillation gamma-ray spectrometer with Progress software. Certificate of Attestation No. 40090.3Н700 dated 12/22/2003. MI 2491-98 Measurement procedure. The content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the wood released on the root. (In Russ.)]

¹⁰ Методика измерений «Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectraLine» (Аттестована ГНМЦ «ВНИИФТРИ», Свидетельство об аттестации № 43151.4Б207/01.002942010 от 28.02.2014) [Measurement technique "Activity of radionuclides in counting samples. Measurement technique on gamma-ray spectrometers using the SpectraLine software (Certified by GNMC VNIIFTRI, Certificate of Attestation No. 43151.4B207/01.002942010 dated 02/28/2014) (In Russ.)]

¹¹ Приказ Рослесхоза от 26.01.2022 № 22 "Об установлении лесопожарного зонирования земель лесного фонда и признании утратившим силу приказа Федерального агентства лесного хозяйства от 05.08.2020 No. 753" [Order of the Federal Forestry Agency No. 22 dated 01/26/2022 "On the establishment of forest fire zoning of forest Fund lands and invalidation of the Order of the Federal Forestry Agency No. 753 dated 08/05/2020" (In Russ.)]

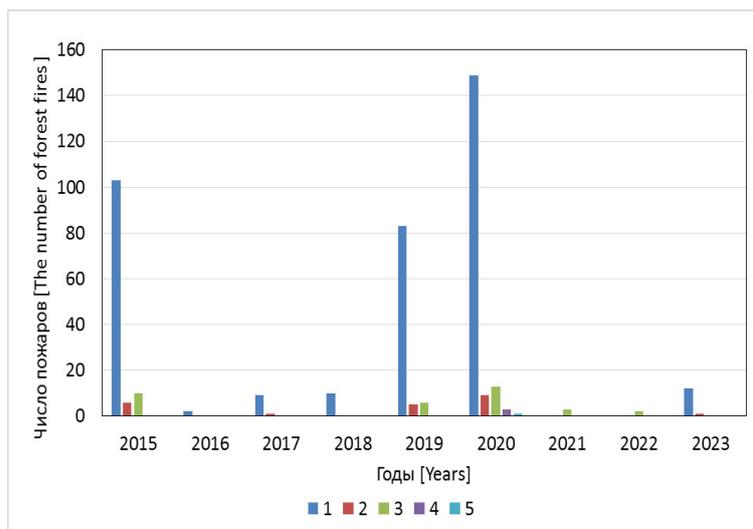


Рис. 1. Количество лесных пожаров, возникших в Брянской области в период с 2015 по 2023 г. по зонам радиоактивного загрязнения (1 – вне зоны радиоактивного загрязнения, 2 – зона низкой степени загрязнения лесов (от 37 до 185 кБк/м²), 3 – зона средней степени загрязнения лесов (от 185 до 555 кБк/м²), 4 – зона высокой степени загрязнения лесов (от 555 до 1480 кБк/м²), 5 - зона крайне высокой степени загрязнения лесов (свыше 1480 кБк/м²))

[Fig. 1. The number of forest fires that occurred in the Bryansk region in the period from 2015 to 2023, by contamination areas (1 – outside the area of radioactive contamination, 2 – low degree area of forest contamination (37 – 185 kBq/m²), 3 – medium degree area of forest contamination (185 – 555 kBq/m²), 4 – high degree area of forest contamination (555 – 1480 kBq/m²), 5 - extremely high degree area of forest contamination (1480 kBq/m² and higher))]

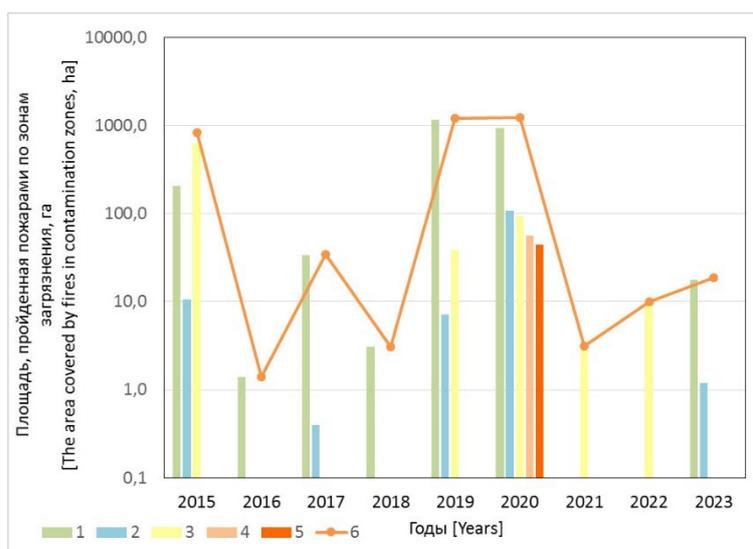


Рис. 2. Динамика площадей лесного фонда Брянской области, пройденных пожарами в период с 2015 по 2023 г. по зонам загрязнения (1 – вне зоны радиоактивного загрязнения, 2 – от 37 до 185 кБк/м², 3 – от 185 до 555 кБк/м², 4 – от 555 до 1480 кБк/м², 5 – свыше 1480 кБк/м², 6 – общая площадь)

[Fig. 2. Dynamics of the areas of the forest fund of the Bryansk region covered by fires in the period from 2015 to 2020, by contamination areas (1 – outside the area of radioactive contamination, 2 – 37–185 kBq/m², 3 – 185–555 kBq/m², 4 – 555–1480 kBq/m², 5 – 1480 kBq/m² and higher, 6 – total area)]

Большинство пожаров ликвидируется на ранних стадиях и не успевают охватить большие площади. Всего за рассматриваемый период произошло 18 крупных пожаров (площадью более 25 га) (5,5 % от общего числа) на площади 1856,32 га, из них в зонах радиоактивного загрязнения 3 пожара (в 2015, 2019 и 2020 гг.) общей площадью 672,6 га.

После внедрения в 2015-2016 гг. в наиболее загрязненных лесничествах системы видеонаблюдения на основе IP-камер, установленных на высотных объектах (вышки сотовой связи) [11] пожаров подобной площади в зонах загрязнения удавалось не допустить. Единственный крупный пожар (44,5 га) с переходом в верховой (рис. 3) произошел

в 2020 г. в 211 квартале Новозыбковского участкового лесничества и 3 – 4 кварталах урочища СХПК «Красная Ипуть».



Рис. 3. Насаждение, повреждённое лесным пожаром 13.04.2020 г. (дата съёмки – 06.06.2020 г.)
[Fig. 3. Forest stand damaged by a forest fire on 13.04.2020 (the shooting date is 06.06.2020)]

Практически все пожары – низовые. Переход в верховые наблюдался только на 3-х пожарах в условиях сложной пирологической обстановки весной (апрель) 2020 г. Общая площадь, пройденная верховыми пожарами составила 55,0 га. Эти пожары были вызваны переходом огня с иных категорий земель – в результате весеннего неконтролируемого выжигания травы в сельхозугодьях и на землях запаса.

Площадь подземных пожаров за исследуемый период составила всего 7,3 га, из них 1 пожар площадью 0,4 га произошел в 2015 г. в зоне высокой степени загрязнения лесов (555 – 1480 кБк/м²).

Сезонность пожаров

Более 75 % пожаров происходит в весенний период – с начала пожароопасного сезона (вторая половина марта) до середины мая, их площадь составила 94 % от всей пройденной пожарами площади. Для зон радиоактивного загрязнения эта тенденция сохраняется. Основной причиной возникновения пожаров в этот период являются сельхозпалы и огонь, перешедший с земель иных категорий (чаще всего, также вызванный возгоранием сухой травянистой растительности).

Причины возникновения лесных пожаров

В условиях Брянской области антропогенный фактор определяет основную группу причин возникновения лесных

пожаров – более 99 %. К ним относят проведение профилактического контролируемого выжигания лесных горючих материалов; по вине населения; по вине лиц, использующих леса; по вине экспедиций, проводящих изыскательские работы в лесу; от линейных объектов (линий электропередач, железных и автомобильных дорог, трубопроводов и иных линейных объектов); от выжиганий сухой травянистой растительности; переход лесного пожара с земель иных категорий; переход лесного пожара через границу субъекта Российской Федерации или государственную границу Российской Федерации. По природным причинам (от гроз) в Брянской области за исследуемый период зарегистрировано менее 0,01% лесных пожаров. Распределение площади, пройденной лесными пожарами по причинам возникновения приведено в таблице 2.

В зонах радиоактивного загрязнения Брянской области выявлено всего 3 причины возникновения лесных пожаров: от выжиганий сухой травянистой растительности, переход огня с земель иных категорий и по вине населения. При этом сельхозпалы занимают первое место (более 60%), переход огня с земель иных категорий – второе (более 30%) и по вине населения, то есть неосторожное обращение с огнем, разведение костров, непогашенные окурки и т.п. – третье (6,5%). Вне зон загрязнения первое место занимают лесные пожары по вине населения (68%), второе – переход огня с земель иных категорий (21%), по остальным причинам в совокупности происходит около 10% лесных пожаров.

Такая структура свидетельствует о снижении численности населения в зонах радиоактивного загрязнения и уменьшении посещаемости загрязненных лесов. Одновременно создаются предпосылки для бесконтрольного проведения сезонного выжигания травянистой растительности.

Ликвидация пожаров

Всего 15 пожаров на площади 881 га за рассматриваемый период потребовали работ по их ликвидации сроком более 1 суток. В 2016–2018, 2021 и 2022 гг. таких пожаров не наблюдалось. В тушении одного пожара принимало участие от 1 до 40 человек.

Средние затраты времени на ликвидацию пожаров в человеко-днях приведены в таблице 3.

Дозовые нагрузки для работников

Фактическая средняя плотность загрязнения участков, пройденных лесными пожарами в зонах радиоактивного загрязнения за период наблюдения – 295 кБк/м², максимальная – 2310 кБк/м². Средняя расчетная мощность амбиентного эквивалента дозы на пожаре 0,43 мкЗв/ч, максимальная – 3,37 мкЗв/ч.

Средняя эффективная доза дополнительного внешнего облучения за одну 8-часовую смену работы на кромке пожара может быть оценена в 1,96 мкЗв, а максимальная – 15,4 мкЗв.

При этом необходимо учесть, что в наиболее тяжелом в пожарном отношении 2020 г. тушение пожаров в зонах радиоактивного загрязнения осуществлялось в течение 30 суток. Основная часть загрязненных радионуклидами лесов Брянской области сосредоточена в 2х соседних лесничествах Злынковском и Клинцовском, поэтому реальная ситуация, при которой работник в полном объеме участвовал в тушении всех радиоактивных пожаров за этот год. Тогда максимальную дополнительную дозу облучения, полученную работником при работе на кромке пожара в течение сезона, с учетом ненормированного рабочего дня (достигающего 2х смен в сутки) можно оценить в ~ 0,81 мЗв.

Таблица 2

Распределение площади, пройденной лесными пожарами по причинам возникновения, процентное соотношение

[Table 2]

Distribution of the area covered by forest fires by causes, percentage ratio]

Причины пожаров	По всему лесному фонду [All forests]	Вне зон радиоактивного загрязнения [Outside the zone of radioactive contamination]	В зонах радиоактивного загрязнения [In the zones of radioactive contamination]
по вине населения [through the fault of the population]	49,93	68,01	6,52
пожар перешел с земель иных категорий [the fire moved from lands of other categories]	24,01	21,30	30,52
от выжиганий сухой травянистой растительности [from burning dry grassy vegetation]	21,11	3,68	62,96
от гроз [from thunderstorm]	0,01	0,01	0
от линейных объектов (железнодорожных путей) [from linear object (railway)]	2,04	2,90	0
по вине лиц, использующих леса [through the fault of people using forests]	0,07	0,10	0
от линейных объектов (линий электропередач) [from linear objects (power lines)]	0,18	0,26	0
по невыясненным причинам [for unexplained reasons]	1,79	2,53	0
пожар перешёл через границу субъекта или государственную границу Российской Федерации [the fire crossed the border of the region or the state border of the Russian Federation)]	0,86	1,21	0
Всего [Total]	100,00	100,00	100,00

Таблица 3

Средние трудозатраты в человеко-днях на ликвидации лесных пожаров в Брянской области

[Table 3]

Average labor costs in man-days for extinguishing of forest fires in the Bryansk region]

В зонах радиоактивного загрязнения и за их пределами [In the zones of radioactive contamination and beyond]	На ликвидацию 1 пожара [To extinguish one fire]	На 1 га площади ликвидированного пожара [Per 1 hectare of extinguished fire]
Всего по региону [Total by region]	10,2	40,0
Вне зон загрязнения [Outside the contaminated zones]	10,0	44,12
По зонам радиоактивного загрязнения, кБк/м ² : [By zones of radioactive contamination, kBq/m ² :]	8,7	9,4
37-185		
185-555	12,3	18,1
555-1480	12,9	11,8
свыше 1480 [above 1480]	11,0	0,2
Всего в зонах загрязнения [Total in the contaminated zones]	10,8	13,6

Оценить вклад внутреннего облучения достаточно сложно, однако ряд исследований [12, 13] показывает, что его доля существенно меньше внешнего облучения. Однако необходимо учитывать, что многие работники, привлекаемые к ликвидации радиоактивных лесных пожаров, выполняют и другие работы в загрязненном лесном фонде, а

также проживают в населённых пунктах, в которых среднегодовые эффективные дозы облучения (СГЭД₉₀) превышают уровень 1 мЗв [14, 15].

Для таких населенных пунктов Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ предусматривает необходимость продолжения

проведения мероприятий по реабилитации и возврату их к нормальной жизнедеятельности [15]. Такими мероприятиями при направлении на работы в лесном фонде, загрязненном радионуклидами, должны быть: учёт СНЭД, СГЭД_ю и обязательный индивидуальный дозиметрический контроль.

Результаты проведенного анализа относятся к землям Гослесфонда. Тема ландшафтных пожаров вне лесного фонда требует отдельного исследования, т.к. наблюдаемые по фиксируемым системами спутникового наблюдения термоточкам возгорания на иных территориях в отдельные годы могут многократно превышать по площади лесные пожары.

Заключение

В условиях существующего радиоактивного загрязнения в лесах Брянской области сохраняется опасность возникновения радиоактивных лесных пожаров. Основные риски возникновения лесных пожаров в зонах радиоактивного загрязнения связаны с выжиганием сухой травянистой растительности (более 60%), переходом огня с земель иных категорий (более 30%) и по вине населения (6,5%).

Большая часть (~ 86%) лесных пожаров в Брянской области не является радиоактивными, так как происходит вне зон радиоактивного загрязнения. Соотношение площадей радиоактивных и не радиоактивных пожаров в годы с высокой горимостью носит случайный характер и связано с географией источников возникновения. В годы с низкой горимостью вероятность возникновения радиоактивных лесных пожаров очень мала.

Проведенный анализ статистики возникновения и ликвидации лесных пожаров свидетельствует об эффективной работе лесопожарной службы. Большинство пожаров не выходит из стадии низовых и тушится в день обнаружения.

Анализ задействованных в тушении радиоактивных лесных пожаров сил показывает, что средняя эффективная доза дополнительного облучения за смену может быть оценена в 1,96 мкЗв, а максимальная в ~ 15,4 мкЗв. Однако работники лесопожарной службы привлекаются к тушению ландшафтных пожаров и на других видах земель, что необходимо учитывать при оценке получаемой ими годовой дозы облучения.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность директору Центра защиты леса Калужской области В.Н. Евсееву и сотрудникам филиала, в особенности С.В. Мишину, А.А. Сулимову, Ю.А. Щербакову, С.В. Салопонову, Н.В. Козареву, В.А. Кучуку, К.В. Дорохову, начальнику Управления лесами Брянской области В.И. Дзубану, сотрудникам Управления и подведомственных организаций за помощь в проведении полевых работ и сборе материалов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

В работе использованы материалы, полученные при выполнении работ в рамках Государственного задания и Государственных контрактов с Рослесхозом в период 2015-2023 гг.

Литература

1. Анисимов В.С., Гераськин С.А., Гешель И.В. и др. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий. Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии. М.: Российская академия наук, 2018. 278 с. ISBN 978-5-906906-81-6. EDN XUBZYU.
2. Раздайковин А.Н., Марадулин И.И., Радин А.И., Ромашкин Д.Ю. Радиоэкологические проблемы в лесах России // Лесохозяйственная информация. 2019. № 3. С. 116-133.
3. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия – Беларусь). Под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича. Москва–Минск: Фонд «Инфосфера»–НИА–Природа, 2009. 140 с.
4. Финогенов А.А., Ткачев В.А., Локшин А.М. и др. Российский национальный доклад: 35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986-2021. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2021. 104 с. ISBN 978-5-907375-02-4. EDN UBYPFY.
5. Перепечина Ю.И., Глушков О.И., Корсиков Р.С., Глушков И.С. Задачи инвентаризации лесов России при проведении второго цикла // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 56. С. 67-72. EDN MNXMA.
6. Марченко Т.А., Радин А.И., Раздайковин А.Н. Ретроспективное и современное состояние лесных территорий приграничных районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 6-18. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-6-18.
7. Гусев В.Г. О методе оценки возможности возникновения и распространения пожаров в лесах по их фактической горимости // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2018. № 2. С. 40-52.
8. Марченко Т.А., Радин А.И., Раздайковин А.Н. Оценка мощности амбиентного эквивалента дозы на лесных участках в юго-западных районах Брянской области // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2023. Т. 32, № 4. С. 67-78. DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-4-67-78. EDN AYLNKA.
9. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. и др. Оценка годовой эффективной дозы внешнего облучения в лесах юго-западных районов Брянской области России: 2015–2021 гг. // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 58-71.
10. Коршунов Н.А., Савченкова В.А., Перминов А.В., Конюшенков М.Е. Перспективные направления применения беспилотных авиационных систем в лесном комплексе // Лесохозяйственная информация. 2022. № 2. С. 34–46. DOI: 10.24419/LNI.2304-3083.2022.2.03
11. Белов А.А., Раздайковин А.Н., Радин А.И. и др. Адаптация системы видеонаблюдения для мониторинга лесов, загрязненных радионуклидами, на сопредельных территориях Российской Федерации и республики Беларусь / Проблемы и перспективы развития территорий, пострадавших в результате катастрофы на чернобыльской АЭС, на современном этапе (г. Хойники, 26–27 июля 2018 г.) Материалы Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. зам. дир. по науч. раб. ГПНИУ «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник», к.с.х. Кудина М.В. Хойники, ГПНИУ «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник». Хойники: ГПНИУ «ПГРЭЗ», 2018. С.192-196.
12. Кашпаров В.А. Миронюк В.В., Журба М.А. и др. Радиоэкологические последствия пожара в Чернобыльской зоне отчуждения в апреле 2015 года // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 5. С. 512–527.

13. Дворник А.А., Дворник А.М., Король Р.А., Гапоненко С.О. Радиоактивное загрязнение воздуха в результате лесных пожаров и его опасность для здоровья человека // Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 2. С. 100-108.
14. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Средние накопленные за 1986-2016 годы эффективные дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения по постановлению Правительства Российской Федерации от 08.10.2015 № 1074 «Об утверждении Перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 2. С. 57–105. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-2-57–105.
15. Panov A.V., Komarova L.N., Lyapunova E.R., Melnikova A.A. Peculiarities of the exposure dose formation on the population in the most affected regions of Russia after the Chernobyl NPP accident. Nuclear Energy and Technology. 2024. Vol. 10, No 1. P. 41–46. DOI: 10.3897/nucet.10.122526.

Поступила: 25.07.2024

Радин Александр Игоревич - заведующий лабораторией радиационного контроля Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства. **Адрес для переписки:** 141200, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15; E-mail: Radin@roslesrad.ru

ORCID: 0000-0001-7334-8946

Марченко Татьяна Андреевна - доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник 4 научно-исследовательского центра Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (федеральный центр науки и высоких технологий), Москва, Россия

Раздайков Андрей Николаевич - заведующий отделом радиационной экологии и экотоксикологии леса Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, Московская область, Пушкино, Россия

ORCID: 0000-0002-7456-5288

Для цитирования: Радин А.И., Марченко Т.А., Раздайков А.Н. Анализ горимости лесов Брянской области в зонах радиоактивного загрязнения и за их пределами // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 133–141. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-133-141

Analysis of forest fire dangers of the Bryansk region in the zones of radioactive contamination and beyond

Aleksander I. Radin^{1,3}, Tatyana A. Marchenko², Andrey N. Razdaivodin¹

¹All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization, Moscow region, Pushkino, Russia

²All-Russian Research Institute on Civil Defence and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal Center for Science and High Technologies), Moscow, Russia

³Mytishi Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytishi, Moscow region, Russia

The purpose of the study is to analyze the forest fire dangers of the Bryansk region forests, taking into account their radioactive contamination and potential risks for forestry workers involved in forest fires extinguishing. Significant areas of radioactive contamination of forests with a predominance of sites belonging to the classes of high and very high natural fire danger, restrictions on economic activity and a long fire-hazardous period contribute to the occurrence of radioactive forest fires. The analysis of the combined data on forest fires and radioactive contamination of forest areas showed that most forest fires occur outside the zones of radioactive contamination and are not radioactive. The largest number of fires occurs at the beginning of the fire season. Radioactive forest fires in most cases arise from the burning of dry grassy vegetation, as a result of the transition from lands of other categories and through the fault of the population. The average effective dose of additional radiation per a workday can be estimated at 1.96 μSv, and the maximum at ~ 15.4 μSv. Most fires are extinguished in the early stages and do not have time to cover large areas. It indicates the effective work of the forest fire service

Key words: radioactive contamination, radioactively contaminated territory, radioactive forest fires, forest fire danger, overcoming the consequences of radiation accidents, protection of the population, life safety of the population.

Alexander I. Radin

All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization

Address for correspondence: Institutskaya ul., 15, Pushkino, Moscow region, 141200; E-mail: Radin@roslesrad.ru

Acknowledgements

The authors express their gratitude and appreciation for assistance in the work to the director of the Kaluga Region Forest Protection Center V.N.Evseev and the employees of the branch, especially [S.V.Mishin](#), A.A.Sulimov, Yu.A.Shcherbakov, S.V.Saloponov, N.V.Kozarezov, V.A.Kuchuk, K.V.Dorokhov, to the head of the Department of Forests of the Bryansk region V.I.Dzuban, employees of the Department and subordinated organizations for assistance in field work and collecting materials.

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 contracts dated 2015–2023 with the Federal Forestry Agency (Rosleshoz).

References

1. Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas. Ed.: NI Sanzharova, SV Fesenko. Moscow, RIRAE; 2018. 278 p. (In Russian).
2. Razdaivodin AN, Maradudin II, Radin AI, Romashkin DY. Radioecological Problems in the Forests of Russia. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya = Forestry information*. 2019;3: 116–133. (In Russian).
3. The atlas of modern and forecast aspects of consequences of the Chernobyl accident in affected territories of Russia and Belarus (AMFA Russia-Belarus). Ed.: Izrael YuA, Bogdevich IM. Moscow-Minsk, Infosfera Fund-Priroda Publ.; 2009. 139 p. (In Russian).
4. 35 years of the Chernobyl accident. Results and prospects of overcoming its consequences in Russia 1986–2021. Russian national report. Ed.: LA. Bolshov. Moscow; 2021. 104 p. (In Russian).
5. Perepechina Yul, Glushenkov OI, Korsikov RS, Glushenkov IS. Tasks of inventory of Russian forests during the second cycle. *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa = Actual problems of the forest complex*. 2020;56: 67–72. (In Russian).
6. Marchenko TA, Radin AI, Razdaivodin AN. Retrospective and current state of forest territories of the border areas of the Bryansk region exposed to radioactive contamination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 6–18. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-6-18.
7. Gusev VG. On the method for assessing the possibility of occurrence and spread of fires in forests according to their actual burning. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2018;2: 40–52. (In Russian).
8. Marchenko TA, Radin AI, Razdaivodin AN. Estimation of ambient dose equivalent rate in forest sites in the south-west of the Bryansk region. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2023;32(4): 67–78. (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-4-67-78.
9. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA, Gromov AV, Titov NV. Assessment of annual effective dose from external exposure in forests of the southwestern districts of the Bryansk region of Russia: 2015–2021. *Radiatsionnaya Gygiena – Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 58–71. (In Russian).
10. Korshunov N, Savchenkova V, Perminov A, Konyushenkov M. Promising Areas of Application of Unmanned Aircraft Systems in the Forest Complex. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya = Forestry information*. 2022;2: 34–46. (In Russian). DOI: 10.24419 / LHI.2304-3083.2022.2.03.
11. Belov AA, Razdaivodin AN, Radin AI, Romashkin DU. Adaptation of the video monitoring system for forest contaminated with radionuclides in adjacent territories of Russian Federation and Republic of Belarus. Problems and prospects of development of territories affected by the Chernobyl disaster at the present stage (Khoyniki, July 26–27, 2018) Materials of the International Scientific and Practical Conference / Ed.: Ph.D. of Biological Sciences Kudin MV. Khoyniki: State environmental research institution «Polesie State Radiation-Ecological Reserve». 2018. P. 192–196. (In Russian).
12. Kashparov VA, Mironyuk VV, Zhurba MA, Zibtsev SV, Glukhovskiy AS, Zhukova OM. Radiological Consequences of the Fire in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2015. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2017;57(5): 512–527. (In Russian).
13. Dvornik AA, Dvornik AM, Korol RA, Gaponenko SO. Radioactive contamination of air as a result of forest fires and its threat to a human health. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2016;25(2): 100–108. (In Russian).
14. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AY, Gromov AV, Zhesko TV, et al. The average accumulated effective doses (1986–2016) for the population of the settlements of the Russian Federation attributed to the zones of radioactive contamination according to the Russian Federation government resolution «On the approval of the list of the settlements being in the borders of the zones of radioactive contamination due to the Chernobyl NPP accident» No 1074 of 08.10.2015. *Radiatsionnaya Gygiena – Radiation Hygiene*. 2017;10(2): 57–105. (In Russian).
15. Panov AV, Komarova LN, Lyapunova ER, Melnikova AA. Peculiarities of the exposure dose formation on the population in the most affected regions of Russia after the Chernobyl NPP accident. *Nuclear Energy and Technology*. 2024;10(1): 41–46. DOI: 10.3897/nucet.10.122526.

Received: July 25, 2024

Alexander I. Radin - Head of the radiation control laboratory of All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization (Institutskaya ul., 15, Pushkino, Moskovskaya obl., 141200, Russia. E-mail: Radin@roslesrad.ru

ORCID: 0000-0001-7334-8946

Tatyana A. Marchenko - Doctor of medical sciences, professor, lead scientist of the 4th research center of All-Russian Research Institute on Civil Defence and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal Center for Science and High Technologies), Moscow, Russia

Andrey N. Razdaivodin - Head of the department of the radiation ecology and ecotoxicology of the forests of All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization, Moscow region, Pushkino, Russia

ORCID: 0000-0002-7456-5288

For citation: Radin A.I., Marchenko T.A., Razdaivodin A.N. Analysis of forest fire dangers of the Bryansk region in the zones of radioactive contamination and beyond. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 133–141. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-133-141.

Обзор подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков

А.С. Васильев, Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская, 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

По данным Росстата в последние годы в Российской Федерации отмечается тенденция к росту интенсивности строительства, при этом увеличивается как численность вводимых в эксплуатацию зданий, так и их общая площадь. Проведение оценки потенциальной радоноопасности земельных участков, отводимых под застройку, обеспечивает возможность своевременного включения в проект зданий необходимых инженерно-строительных решений, направленных на предупреждение проникновения радона в воздух помещений или снижение уровня уже поступившего радона при значениях плотности потока радона с поверхности грунта в пределах площади застройки выше установленных гигиенических нормативов (уровней действия). В статье представлен обзор отечественных и зарубежных подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков, проводимой в рамках инженерно-экологических изысканий. Проанализированы действующие нормативные требования к показателям радиационной безопасности земельных участков, отводимых под строительство жилых, общественных и производственных зданий и сооружений в Российской Федерации. Описаны основные недостатки алгоритма определения потенциальной радоноопасности земельных участков, используемого в действующих методических указаниях МУ 2.6.1.2398-08, утвержденных на федеральном уровне уже более 15 лет назад. Представлены критические замечания (неинформативность величины плотности потока радона с поверхности грунта для проектирования противорадионовой защиты здания, отсутствие учета сезонных вариаций плотности потока радона и другие), накопившиеся за прошедшие годы в результате практического применения данного документа. Проанализированы достоинства и недостатки зарубежных подходов к оценке потенциальной радоноопасности территории на основе результатов измерений объемной активности радона в почвенном воздухе, а также сама возможность перехода в отечественном нормировании от величины плотности потока радона с поверхности грунта к величине объемной активности радона в почвенном воздухе. Рассмотрены некоторые рациональные предложения коллективов специалистов из различных профильных организаций по усовершенствованию алгоритма определения потенциальной радоноопасности земельных участков.

Ключевые слова: радон, плотность потока радона, объемная активность радона, радон в почвенном воздухе, радиационный контроль, инженерно-экологические изыскания, земельные участки, угольные адсорберы, открытая накопительная камера.

Введение

В конце XX века в нашей стране активно проводились работы по внедрению радиационного контроля в практику инженерных изысканий для строительства [1–3]. С 2000 г. нормируемым показателем при оценке потенциальной радоноопасности земельных участков в России^{1,2}, а также в

ряде постсоветских стран (Армения, Белоруссия, Киргизия, Таджикистан)³ является плотность потока радона с поверхности грунта (ППР). При этом нормируемый показатель является по своей сути уровнем вмешательства (действия), а не гигиеническим нормативом [4]. В последние годы во многих субъектах Российской Федерации при обследовании зданий, построенных и введенных в эксплуатацию без

¹ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115), с изменениями, внесенными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 № 43 (зарегистрировано Минюстом России 05.11.2013, регистрационный № 30309). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18155), as amended by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 16.09.2013 No. 43 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No. 30309). (In Russ.)]

² Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации

Васильев Алексей Серафимович

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

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

учета радиационных характеристик территории и применяемых строительных материалов, выявлялись помещения, в которых содержание радона в воздухе превышало установленные гигиенические нормативы [5, 6].

По данным Росстата, с 2015 по 2021 гг. в России отмечается тенденция к росту интенсивности строительства: так в 2021 г. было введено в эксплуатацию 403,1 тыс. зданий, общей площадью 148,4 млн м², тогда как в 2020 г. – 326,7 тыс. зданий, общей площадью 143,4 млн м² [7]. Проведение оценки потенциальной радоноопасности земельных участков в рамках инженерно-экологических изысканий является превентивной мерой, позволяющей на стадии проектирования здания 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 низком уровне и является актуальной проблемой обеспечения радиационной безопасности населения России [8–10].

Основной целью настоящего обзора является обобщение и анализ отечественной и зарубежной научной литературы по оценке потенциальной радоноопасности земельных участков для улучшения алгоритма их радиационного контроля в рамках будущей актуализации МУ 2.6.1.2398-08⁴.

Нормативно-методические документы

Общие правила проведения инженерно-экологических изысканий для строительства регламентируются сводом правил СП 502.1325800.2021⁵, в котором использованы ссылки на санитарные нормы и правила по радиационной безопасности: НРБ-99/2009⁶, ОСПОРБ 99/2010, СанПиН 2.6.1.2800-10. В Российской Федерации порядок проведения радиационного контроля земельных участков регламентируется методическими указаниями МУ 2.6.1.2398-08, разработанными ведущими специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и других ведомств и организаций.

Так, при отводе земельного участка для строительства

жилых, общественных или производственных зданий или сооружений проведение измерений ППР в пределах контура объекта строительства (при наличии) с помощью угольных адсорберов или накопительных камер является обязательной составляющей инженерно-экологических изысканий. Целью проведения этих измерений является обеспечение возможности своевременного включения в проект здания необходимых инженерно-строительных решений, направленных на предупреждение проникновения радона в воздух помещений (пассивные технологии защиты зданий от радона) или снижение уровня уже поступившего радона (активные технологии) при значениях ППР свыше 80 МБк/(м²·с) для участков, отведенных под строительство жилых и общественных зданий, или 250 МБк/(м²·с) для участков, отведенных под строительство производственных зданий и сооружений [9]. В ряде случаев⁷ требуется определение ППР на отметке заложения подошвы фундамента. При этом важно отметить, что измерения ППР не проводятся под открытыми площадками, навесами и т.п.⁸.

Согласно действующим МУ 2.6.1.2398-08, для дополнительной оценки потенциальной радоноопасности земельных участков могут быть использованы следующие данные:

- объемная активность (ОА) радона в воздухе подвальных помещений или/и помещений первых этажей близлежащих зданий;
- ОА радона в почвенном воздухе на глубине 0,5–1,0 м от поверхности почв и грунтов на территории застройки;
- геологические и геофизические характеристики участка территории (наличие разломов, трещин и пр.);
- удельная активность (УА) ²²⁶Ra в подстилающих породах, определяемая по результатам анализа содержания радионуклидов в керне при проведении буровых работ.

Для прогнозной оценки потенциальной радоноопасности больших площадей (крупных территорий) при составлении региональных программ проведения радиационных обследований коллективом авторов, объединенным ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, в 2006 г. были разработаны специальные методические рекомендации, которые, к сожалению, не были утверждены в установ-

рации 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.)]

³WHO Global Health Observatory data repository. Radon database. URL: <https://apps.who.int/gho/data/node.main.RADON05> (Дата обращения: 26.06.2024). [Accessed 26 June 2024].

⁴Радиационный 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 (далее – МУ 2.6.1.2398-08). [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 (hereinafter – MU 2.6.1.2398-08). (In Russ.)]

⁵Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ: свод правил СП 502.1325800.2021. Утверждены приказом Министра 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.)]

⁶Нормы 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.)]

⁷МУ 2.6.1.2398-08, п. 6.10. [MU 2.6.1.2398-08, §6.10. (In Russ.)]

⁸МУ 2.6.1.2398-08, п. 3.4. [MU 2.6.1.2398-08, §3.4. (In Russ.)]

ленном порядке на уровне надзорного ведомства⁹.

На обслуживаемых Федеральным медико-биологическим агентством (ФМБА России) территориях при оценке потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий могут быть использованы методические указания МУ 2.6.1.038-2015¹⁰. Этот документ был утвержден в 2015 г. ФМБА России, который является «федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции <...> по осуществлению федерального государственного санитарно-эпидемиологического контроля <...> на отдельных территориях России, в том числе на объектах и территориях закрытых административно-территориальных образований, по перечню, утверждаемому Правительством России»¹¹. Таким образом, предназначены эти МУ для применения исключительно на обслуживаемых ФМБА России территориях подведомственными агентству организациями. Кроме того, как показывает практика, описанный в этих методических указаниях порядок оценки потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство, как правило, вызывает серьезные трудности у организаций, занимающихся выполнением инженерно-экологических изысканий, а выполнение требований к объему инженерных изысканий, предусмотренных МУ 2.6.1.038-2015, приводит к значительному увеличению сроков выполнения комплекса изыскательных работ. С одной стороны, если ППР на обследованной площади участка в контрольных точках не превышает уровень действия, то выполнение буровых, лабораторных и аналитических работ представляется излишним. С другой стороны, при превышении уровня действия по показателю ППР отбор проб грунта из пробуренных на участке скважин из разнородных литологических слоев и проведение лабораторных измерений их радиационно-физических характеристик (за исключением почвенно-растительного слоя) оправдан, поскольку полученные данные необходимы для проектирования противорадоновой защиты новых жилых и общественных зданий в соответствии со сводом правил СП 321.1325800.2017¹².

Основные недостатки алгоритма определения потенциальной радоноопасности земельных участков, описанного в МУ 2.6.1.2398-08

Алгоритм оценки потенциальной радоноопасности земельных участков путем проведения измерений ППР в соответствии с действующим методическим документом Роспотребнадзора неоднократно подвергался критике мно-

гими коллективами специалистов из разных профильных организаций [9, 10, 12].

Исходно измерения должны проводиться на дневной поверхности грунта, что автоматически подразумевает допущение о том, что параметры радоновыделения грунтов остаются неизменными по глубине до отметки заложения подошвы фундамента (ведь при подготовке котлована часть верхнего активного слоя грунта удаляется), однако опубликованные результаты исследований [2, 13–17] не подтверждают данную гипотезу. В реальных условиях слои грунта сильно неоднородны по своим физическим характеристикам, УА ²²⁶Ra, могут содержать подземные сооружения, трубопроводы, кабели, иные инженерные коммуникации различного диаметра и даже норы животных (на пустырях), а также разломы и трещины [12, 18, 19]. Глубина котлованов при строительстве современных зданий (например, многоэтажного жилого комплекса с подземной парковкой) может достигать от единиц до десятков метров, доходя до более плотных или наоборот рыхлых пород по сравнению с приповерхностным слоем грунта [18]. Таким образом, по мнению некоторых авторов, проведение измерений ППР на дневной поверхности грунта приводит к недостоверным оценкам радоноопасности участков застройки, а наиболее точную информацию можно получить при проведении измерений ППР на отметке заложения подошвы фундамента [9, 13, 20]. Однако и это не может гарантировать получение 100% достоверной информации, т.к. из-за наличия так называемого стек-эффекта после окончания строительства здания или сооружения значение ППР в пределах контура здания может существенно измениться по сравнению с первоначально измеренным значением в зависимости от конструкции фундамента и его нагрузки на грунт, типа здания и режима его эксплуатации [11, 21]. Кроме того, на практике проведение измерений ППР на отметке заложения подошвы фундамента не всегда осуществимо из-за организационных сложностей, связанных с проведением таких измерений (например, котлован может быть залит водой после интенсивных дождей или из-за поступления грунтовых вод) [1, 21]. Достоинства и недостатки методов определения ППР на дневной поверхности грунта, на отметке заложения подошвы фундамента и другими способами подробно описаны в статье А.М. Маренного [21].

Возможность проводить измерения ППР при промерзании грунтов на глубину не более 0,1 м не развивается далее по тексту МУ 2.6.1.2398-08 в указание заранее удалять слой промерзшего грунта на площадках, подготавливаемых к

⁹ Оценка потенциальной радоноопасности крупных территорий: Методические рекомендации. Утверждены директором ФГУП ИТЦ РХБГ ФМБА России, 2006. [Assessment of potential radon hazard of large areas. Guidelines. Approved by the Director of the Federal State Unitary Enterprise "Research and Technical Center of Radiation and Chemical Safety and Hygiene" of the FMBA of Russia, 2006. (In Russ.)]

¹⁰ Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий: Методические указания МУ 2.6.1.038-2015. Утверждены заместителем руководителя ФМБА России, Главным государственным санитарным врачом по обслуживаемым организациям и обслуживаемым территориям 15.05.2015. [Assessment of potential radon hazard of land plots for construction of residential, public and industrial buildings. Guidelines MU 2.6.1.038-2015. Approved by the Deputy Head of the FMBA of Russia, the Chief state sanitary doctor for serviced organizations and serviced territories on 15.05.2015. (In Russ.)]

¹¹ Постановление Правительства РФ от 11.04.2005 № 206 «О Федеральном медико-биологическом агентстве» (ред. от 28.07.2022). [Decree of the Government of the Russian Federation of 11.04.2005 No. 206 "On the Federal Medical-Biological Agency" (as amended on 28.07.2022). (In Russ.)]

¹² Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты: Свод правил СП 321.1325800.2017. Утвержден приказом Минстроя 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.)]

проведению измерений, а рекомендация по контролю влажности грунтов, которая оказывает основное влияние на значение ППР и его вариабельности, апеллирует к некому «характерному для данной местности состоянию», информация о котором у сотрудников испытательных лабораторий (ИЛ) в подавляющем числе случаев отсутствует, а сама влажность грунта (особенно в приповерхностном слое) в течение суток может варьироваться в широких пределах [14, 18, 20, 22]. Опубликованные научные работы показывают, что с увеличением влажности грунта после выпадения атмосферных осадков или таяния ранее выпавшего снега эксхалляция радона с поверхности грунта снижается практически до нулевых значений из-за увеличения степени заполнения пор водой (влагонасыщенности) и, соответственно, снижения газопроницаемости [9, 14, 16, 23–25].

Еще одним недостатком использования методики определения ППР как критерия радоноопасности участка застройки в соответствии с МУ 2.6.1.2398-08 является отсутствие учета сезонных вариаций измеряемой величины [9]. На одном и том же участке застройки величина ППР может изменяться более чем на порядок на протяжении года в зависимости от сезона и метеорологических условий окружающей среды (температуры воздуха, атмосферного давления) [1, 3, 8, 12, 16, 19, 23, 24, 26–28]. Экспериментальные исследования показали, что среднее значение ППР, измеренное на специально оборудованной («эталонной») площадке в пределах г. Москвы, в теплый период года было в 2,2 раза выше, чем в холодный [29], что подтверждается результатами более поздних исследований других авторов [30, 31]. Кроме того, в работах [32, 33] была описана положительная корреляция изменений значений ППР с изменениями солнечной активности. Таким образом, одно значение ППР, измеренное в произвольный момент времени, зависит от случайной комбинации множества влияющих факторов и не может считаться достоверной оценкой потенциальной радоноопасности, а также служить основанием для принятия решения о реализации мероприятий по защите от радона [1, 2, 9, 10, 18, 21]. Т.е. один и тот же земельный участок в разные моменты времени, в зависимости от случайного сочетания вышеуказанных факторов, может быть классифицирован как «радонобезопасный» для строительства зданий и сооружений любого назначения со средним значением ППР не более 80 мБк/(м²·с) или как «радоноопасный» [8, 14, 16, 25].

В.С. Яковлева отмечает, что при обследовании территорий и определении степени их потенциальной радоноопасности отсутствует также учет суточной вариабельности ППР [23]. Так при выполнении измерений в рабочее (дневное) время, когда, как правило, наблюдаются минимальные значения ППР, результат оценки ППР может быть существенно занижен [23], или наоборот завышен за счет выноса из грунта влаги под действием прямых солнечных лучей, а также при резком и значительном по амплитуде падении атмосферного давления [14]. Кроме того, отсутствует учет

влияния торона и его дочерних продуктов распада (ДПР) (в частности, ²¹²Pb с периодом полураспада 10,6 ч) на результат измерения ППР, что может увеличивать неопределенность измерения в зависимости от уровня содержания ²³²Th в исследуемом материале [3, 34]. Однако результаты экспериментальных и расчетных исследований показывают, что при проведении измерений ППР с помощью угольных адсорберов (например, при использовании Комплекса измерительного для мониторинга радона «КАМЕРА-01» (ЗАО «НТЦ «НИТОН», Россия)) влияние эксхалляции торона на результат измерения незначителен [31].

Также специалистами была отмечена неинформативность показателя ППР, поскольку измеренная величина не дает исходных данных для проектирования противорадионной защиты здания [9, 10]. При расчете требуемых радионезащитных характеристик ограждающих конструкций здания в соответствии со сводом правил СП 321.1325800.2017 величина ППР не используется, а наибольшее значение имеют характеристики грунта (УА ²²⁶Ra в грунте на глубине до 6 м от отметки заложения подошвы фундамента, плотность грунта и др.) [9]. Не говоря уже о том, что само численное значение гигиенического норматива по показателю ППР было рассчитано в прошлом столетии с учетом некоторых не оправдавшихся в дальнейшем предположений о механизмах поступления радона в «эталонный дом» [9].

Необходимо также упомянуть, что существующий порядок проведения оценки потенциальной радоноопасности земельных участков подразумевает проведение измерений на ранее неиспользованной территории (на пустырях, бывших землях сельскохозяйственного назначения), не предусматривает возможного наличия на участке каких-либо строений и сооружений, т.е. не принимает во внимание интенсивность современного строительства в условиях плотной городской застройки (особенно в инвестиционно привлекательных районах крупных городов с развитой инфраструктурой) [35].

Кроме того, учитывая современные требования ряда ГОСТов^{13,14}, нуждаются в актуализации некоторые пункты МУ 2.6.1.2398-08, касающиеся оценки неопределенности измерений, представления результатов радиационного контроля и оформления протоколов обследований [4].

Предложения по усовершенствованию алгоритма определения потенциальной радоноопасности земельных участков

В статье А.А. Цапалова с соавторами [31] приводится весомое обоснование преимуществ использования при определении потенциальной радоноопасности территорий открытых накопительных камер (НК), заполненных активированным углем массой около 5 г, с длительностью непрерывного экспонирования НК от 3 до 5 ч (т.е., по сути, методики измерений с помощью Комплекса измерительного для мониторинга радона «КАМЕРА-01»), вместо рекомендуемого международным стандартом ISO 11665-7 [36] накопления радона в закрытом контейнере.

¹³ Пункт 7.4 ГОСТ 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. §7.4. (In Russ.)]

¹⁴ ГОСТ 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.)]

С другой стороны, согласно патенту RU 2656131 С1 специалистов из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» [37], измерение ППР следует проводить в течение 1 ч в контрольных точках (на дне котлована, вырытого под фундамент строящегося здания) на расстоянии 10 м друг от друга с использованием НК с активированным углем. Предложение о проведении измерений ППР в контрольных точках, расположенных по сетке 10×10 м на отметке заложения подошвы фундамента, является, в некотором роде, заимствованием из действующих МУ 2.6.1.2398-08 (требования п. 6.2.2, объединенные с требованиями п. 6.7). Кроме того, предлагаемая в патенте схема проведения измерений – экспонирование НК с активированным углем строго в течение 1 ч и дальнейшее определение ППР на основе результата измерения накопленной в угле активности радона по бета-излучению его короткоживущих ДПР ^{214}Pb и ^{214}Bi – фактически заставляет ИЛ, аккредитованные в установленном порядке на соответствующий вид измерений, использовать в своей деятельности только одно единственное средство измерений (СИ) ППР из нескольких, внесенных в государственный реестр СИ, а именно Комплекс измерительный для мониторинга радона «КАМЕРА-01», причем с ограничением в соответствующей методике выполнения измерений (МВИ) ППР. Данное обстоятельство может быть негативно воспринято участниками рынка услуг по радиологическому обследованию земельных участков.

И.В. Ярмошенко с соавторами из Института промышленной экологии УрО РАН предлагают метод оценки радоноопасности участка с учетом потенциальной адвективной составляющей потока радона из грунта в здание, который позволяет прогнозировать ОА радона в возведенном здании, учитывая его конструкционные характеристики [38–40]. Принимая во внимание преобладание адвективного (конвективного) механизма поступления радона в воздух помещений над диффузионным, особенно в районах с суровыми климатическими условиями из-за стек-эффекта, предложенный метод весьма перспективен, однако не может быть оперативно внедрен в отечественную практику в системе Роспотребнадзора, поскольку необходимое оборудование для активации и измерения адвективной составляющей (накопительная камера, радон-монитор, дифференциальный манометр и др.), как правило, отсутствует в ИЛ ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъектах РФ, а их закупка потребует весьма значительных финансовых затрат.

Н.К. Рыжаковой с соавторами [41] был предложен подход к оценке степени радоноопасности участков застройки, позволяющий избежать проведения трудоемких измерений ППР, снизить финансовые, материальные и трудовые затраты на строительство, который основывается, в первую очередь, на основных видах грунтов, определяющих «активный» слой в основании фундаментов зданий, а также их физических свойствах. Результаты измерений ППР на поверхности нескольких типов грунтов, а также влажности и УА ^{226}Ra представлено в статье [41], однако представляется, что все разнообразие грунтов, встречающихся на территории РФ, учитывая многообразие признаков, лежащих в основе их классификации, с учетом всего диапазона возможных значений влажности и других параметров, превращает задачу по составлению предлагаемой классификации участков в практически невыполнимую.

На необходимости закрепления нормативными доку-

ментами проведения прогнозного расчета среднегодового значения ЭРОА радона в воздухе помещений проектируемого здания на основании конкретных физических характеристик геологического разреза (УА ^{226}Ra в породах, коэффициент эманирования пород, коэффициент диффузии радона в породах, ОА радона в почвенном воздухе на глубине нулевых годовых амплитуд и т.п.) было акцентировано внимание в статье П.С. Микляева и Т.Б. Петровой [14].

Для участков без радоновых аномалий в качестве основной характеристики потенциальной радоноопасности территорий П.С. Микляев с соавторами в статье [16] предлагает использовать расчетное ожидаемое среднегодовое значение ППР, рассчитываемое по формуле:

$$\text{ППР}_p = k \cdot \text{P}_{\text{Rn}} = k \cdot A_{\text{Ra}} \cdot K_{\text{em}} \cdot \rho, \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{с}$$

где: P_{Rn} – радоновый потенциал грунта, представляющий собой ОА свободного радона в условиях радиоактивного равновесия с радием, Бк/м³; k – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность скорости, м/с; A_{Ra} – УА ^{226}Ra в грунтах, Бк/кг; K_{em} – коэффициент эманирования; ρ – плотность грунта, кг/м³.

Другие косвенные (расчетные) методы определения ППР подробно представлены и описаны в монографии В.С. Яковлевой [3].

Коллективом авторов из ФГУП «ВИМС» был предложен метод оценки потенциальной радоноопасности территорий по УА ^{210}Po и ^{210}Pb в почвах, грунтах и осадочных породах (с радиохимическим выделением определяемых радионуклидов), который представляет собой упрощенную версию изотопно-почвенного метода поисков глубокозалегающих месторождений урана, разработанного В.И. Малышевым и др. в 1984 г. [42].

Для выявления аномальных радоновых полей в рамках оценки потенциальной радоноопасности территорий также был предложен неравновесный изотопный геохимический метод, основанный на оценке отношения УА ^{210}Pb (долгоживущего ДПР радона) и ^{226}Ra (материнского по отношению к радону радионуклида) в грунтах, являющегося характеристикой, не зависящей от временных колебаний радонового поля (зависимость от которых является недостатком эманиционных методов) и отражающей наличие постоянно существующего в течение длительного времени восходящего потока ^{222}Rn [2, 15].

Ю.А. Баннов, специалист одной из частных лабораторий, предлагал для оптимизации радиационного контроля при оценке радоноопасности земельных участков в качестве критерия использовать не среднее арифметическое значение ППР, а среднее геометрическое, что сгладило бы влияние единичных аномальных значений (т.н. «факельных выбросов»), в разы превышающих фоновые значения, на конечную интерпретацию полученных результатов [12]. В статьях П.С. Микляева с соавторами [2, 16, 19, 43] подтверждается логнормальное распределение ППР и отмечено, что «факельные выбросы» радона встречаются в любое время года, устойчивы во времени и пространстве и, как правило, не являются результатом случайного совпадения метеорологических условий окружающей среды, а также не связаны с возможными нарушениями методики проведения измерений или с повышенным содержанием ^{226}Ra в приповерхностных слоях грунта (на примере наиболее изученной в настоящее время территории г. Москвы).

Белорусскими специалистами [44, 45] был предложен метод оценки радоновой опасности территории с помощью

комплексного радонового показателя (КРП), позволяющий снизить финансово-временные затраты и сузить площадь исследований до территории потенциальных критических зон радоноопасности, а также достаточно точно прогнозировать значение ОА радона в воздухе закрытых помещений. КРП представляет из себя величину, равную произведению значений таких факторов, как мощность дозы дочернобыльского фона (ретроспективные данные из карт), ^{238}U в почве, коэффициент фильтрации почвы, а также глубина залегания первого водоносного горизонта в относительных единицах [44–46].

В последние десятилетия в ряде европейских стран на земельных участках, отводимых под строительство зданий и сооружений, определению подлежит радоновый индекс места застройки (RI). В Чешской Республике радоновый индекс RI рассчитывается на основании результатов измерений ОА радона в почвенном воздухе и прямых измерений газопроницаемости почвы или ее экспертной оценки [47]. Классификация радонового индекса RI на низкий, средний или высокий зависит, в первую очередь, от третьего квартиля распределения полученных значений ОА радона в почвенном воздухе [47].

В Швеции принята классификация земельных участков по трем классам риска в зависимости от величины ОА радона в почвенном воздухе на глубине 1 м, и каждому уровню риска соответствуют свои требования к конструкции здания [48]: низкая радоноопасность (менее 10 кБк/м^3) – специальные требования отсутствуют (“Traditional design”); нормальная радоноопасность (от 10 до 50 кБк/м^3) – требуется радонозащитная конструкция (“Radon-protecting design”); высокая радоноопасность (свыше 50 кБк/м^3) – требуется радононепроницаемая конструкция (“Radon-proof design”). В одних случаях наличие определенных подстилающих пород позволяет предварительно отнести участок к какому-то конкретному классу (например, присутствие в подстилающих породах глинистых (квасцовых) сланцев говорит о высокой радоноопасности, а известняка, песчаника, кварцита – о низкой). В других случаях, когда подстилающие породы представлены, например, гранитами, пегматитами, гнейсами (в том числе в виде морены, гравия или песка разной крупности), такая однозначная классификация невозможна, поскольку влияние на результирующее значение ОА радона в почвенном воздухе оказывает не только ^{226}Ra , для которой в данных породах характерна значительная вариабельность, но и проницаемость конкретной породы и ее эманулирующая способность.

Специалисты из ДВГУПС в результате трехгодичного исследования вариации ОА радона в почвенном воздухе и ППР на экспериментальном полигоне выявили сильную (в 2011 г.) и заметную (в 2012, 2013 гг.) связь между этими величинами [49]. Коллективом других авторов в 2009 г. впервые была установлена квадратичная зависимость между этими величинами: ППР по мере увеличения ОА радона в почвенном воздухе вначале растет, достигая максимальной величины, а затем уменьшается, однако данные выводы были сформулированы на ограниченной выборке геологических сред (только для диктионемовых сланцев и песчано-глинистых отложений) [50]. Имеющиеся данные имеют ограниченный характер и не учитывают всего разно-

образия видов грунтов и горных пород, встречающихся на территории РФ.

Значение ОА радона в почвенном воздухе, полученное при измерении на определенной глубине (например, 0,8 м согласно наиболее известному методу, предложенному чешскими специалистами [47]), может быть как заниженным (при многокомпонентном, не гомогенном составе грунта и наличии толстого верхнего слоя глины), так и завышенным (при наличии в верхнем слое грунта пород, богатых ^{238}U или ^{226}Ra) по отношению к реальной эксхалляции радона с поверхности грунта. Помимо глубины отбора, уровень ОА радона в почвенном воздухе зависит также от газопроницаемости грунта (стандартизованная методика измерения которой отсутствует [41]), размеров полости, из которой проводится отбор, а также от применяемой техники отбора проб [47].

По мнению П.С. Микляева с соавторами, для определения радоноопасности территорий целесообразно использовать значение ОА радона в почвенном воздухе на глубине около 1 м, т.к. данный показатель обладает теми же недостатками, что и ППР [18]. Многолетний мониторинг показал наличие сезонной и суточной вариабельности данного показателя (хоть и менее выраженной, чем для ППР [16]): средний уровень ОА радона в почвенном воздухе в холодный период года в 2,5 раза выше, чем в теплый, а в ночное время выше, чем в дневное примерно на 18% (в теплое время года) и 3,8% (в холодное время года), в связи с чем венгерские специалисты предлагают оценивать результат единичного измерения ОА радона в почвенном воздухе с учетом поправки на сезонность [51, 52]. В приповерхностных слоях грунты (на глубине 0,25 и 0,75 м) наблюдаются значительные временные вариации ОА радона, и только на глубине около 3 м она принимает постоянное значение, обусловленное ^{226}Ra [14, 25]. В другой работе [53] показано, что на глубине 1,8 м влияние атмосферного давления на значение ОА радона в почвенном воздухе снижается или вовсе отсутствует.

В статье [10] в рамках обсуждения актуализации ОСПОРБ 99/2010 и гармонизации с международными рекомендациями предлагается отказаться от ограничения ППР на участках застройки и ввести классификацию территорий по степени потенциальной радоноопасности по методике, описанной в МУ 2.6.1.038-2015 ФМБА России.

Таким образом, одномоментный переход в нормировании от величины ППР к величине ОА радона в почвенном воздухе пока что не представляется возможным, поскольку отсутствует единый подход не только к процедуре измерения данного показателя, но и к классификации его значений: иными словами, однозначно не определено, какую ОА радона в почвенном воздухе считать условно нормальной, а какую – повышенной и высокой, что потребует определенных действий со стороны проектной организации и застройщика. Кроме того, в государственном реестре СИ¹⁵ нет оборудования, которое могло бы определять газопроницаемость грунта *in situ*. Также можно отметить, что для измерений ОА радона в почвенном воздухе с помощью некоторых типов СИ зарубежного производства требуются определенные расходные материалы к вспомогательному оборудованию (например, в случае радиометра AlphaGUARD любых модификаций с комплектом «Soil Gas

¹⁵ Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (Дата обращения: 26.06.2024) [Federal Information Fund for ensuring the uniformity of measurements. Approved types of measuring instruments. Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> [Accessed 26 June 2024]. (In Russ.)]

Probe» таким расходным материалом являются металлические наконечники пробоотборника, остающиеся после проведения измерения в грунте), поставка которых в условиях нынешней сложной геополитической ситуации весьма затруднительна, а импортозамещение пока не налажено вследствие отсутствия реального спроса.

Заключение

Алгоритм проведения радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения, включая определение потенциальной радоноопасности земельных участков, описанный и предложенный впервые на федеральном уровне более 15 лет назад в МУ 2.6.1.2398-08, имеет как свои достоинства, так и недостатки.

Проведенный анализ научной литературы по данной тематике выявил ряд критических замечаний, основными из которых являются следующие:

1) отсутствие в существующем алгоритме оценки потенциальной радоноопасности земельных участков возможности проведения радиационного контроля на производном этапе подготовки участка (когда контура будущей застройки еще не определены; в пределах контуров застройки; на отметке заложения подошвы фундамента);

2) неинформативность величины ППР для проектирования противорадоновой защиты здания, с одной стороны, а с другой стороны, отсутствие нормативов на ОА радона в почвенном воздухе, отсутствие единого подхода к ее измерению, а также ее сезонная и суточная вариабельность, сопоставимая с ППР;

3) отсутствие учета сезонных вариаций ППР, зависящих, однако, от случайной комбинации множества влияющих факторов;

4) использование среднего арифметического значения ППР вместо среднего геометрического, несмотря на актуальные научные данные о логнормальном характере распределения значений ППР.

При разработке актуализированного проекта методического документа взамен МУ 2.6.1.2398-08 целесообразно руководствоваться накопившимся за последние годы опытом практического применения данного документа, критическими замечаниями и рациональными предложениями специалистов различных профильных организаций, опытом зарубежных стран, представленных в статье, а также учитывать имеющуюся номенклатуру СИ, внесенных в государственный реестр СИ.

Перспективой дальнейшей разработки темы по оценке потенциальной радоноопасности земельных участков может являться пересмотр численных значений установленных гигиенических нормативов (уровней действия) по величине ППР с учетом текущего уровня научных знаний, а также установление нового норматива (взамен ППР или, скорее, наряду с ним) по величине ОА радона в почвенном воздухе в рамках актуализации санитарных правил.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Васильев А.С. написал черновик рукописи, провел поиск и анализ литературных данных и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Кононенко Д.В. провел поиск и анализ литературных данных, подготовил английский перевод и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кормановская Т.А. проанализировала действующие требования к показателям радиационной безопасности земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения и отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. 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. Микляев П.С. «ЧТО ДЕЛАТЬ?» или "радоновый кризис" в радиационных изысканиях (впечатления от прочтения статьи Ю.А. Баннова "Лаборатория радиационного контроля ООО "ГЕОКОН". Два года: опыт работы") // АНРИ. 2005. № 3. С. 60–64.
2. Микляев П.С., Макаров В.И., Дорожко А.Л. и др. Радоновое поле Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. № 2. С. 172–187.
3. Яковлева В.С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 174 с.
4. 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-2024-17-2-138-147.
5. 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.
6. 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.
7. Строительство в России: Стат. сб. / Росстат. М., 2022. 148 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Stroit_2022.pdf (Дата обращения: 26.06.2024).
8. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Климшин А.В., Смирнова А.П. Картирование геогенного радонового потенциала (на примере территории Москвы) // АНРИ. 2015. № 1. С. 2–13.
9. Гулябянц Л.А., Калайдо А.В. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий: монография. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 236 с.

10. 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.
11. Маренный А.М., Охрименко С.Е., Павлов И.В. Задачи и методы оценки потенциальной радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2006. № 2. С. 25–30.
12. Баннов Ю.А. Лаборатория радиационного контроля ООО "ГЕОКОН". Два года: опыт работы // АНРИ. 2005. № 2. С. 54–72.
13. Гулябняц Л.А., Заболотский Б.Ю. Плотность потока радона как критерий оценки радоноопасности // АНРИ. 2004. № 3. С. 16–20.
14. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2007. № 2. С. 2–16.
15. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Цапалов А.А., Борисов А.П. Опыт применения изотопного геохимического метода для исследования условий переноса радона к дневной поверхности // АНРИ. 2012. № 1. С. 15–21.
16. Микляев П.С., Маренный А.М., Цапалов А.А., Петрова Т.Б. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Основные результаты // АНРИ. 2017. № 4. С. 2–22.
17. Охрименко С.Е., Коренков И.П., Микляев П.С. и др. Ранжирование территорий Москвы по потенциальной радоновой опасности // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 3. С. 211–216. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-3-211-216.
18. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Охрименко С.Е. Новые аспекты оценки радоноопасности территорий строительства на примере Москвы // АНРИ. 2003. № 4. С. 63–71.
19. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный М.А. и др. Карта плотности потока радона на территории Москвы // АНРИ. 2012. № 3. С. 15–24.
20. Рыжакова Н.К., Ставицкая К.О., Удалов А.А. Проблемы оценки потенциальной радоноопасности участков застройки // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 37–44. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-37-44.
21. Маренный А.М. Радон в инженерно-экологических изысканиях для строительства // АНРИ. 2008. № 2. С. 21–28.
22. Баннов Ю.А. ЛРК ООО "Сталкер". 10 лет: опыт работы // АНРИ. 2013. № 4. С. 72–88.
23. Яковлева В.С., Нагорский П.М., Яковлев Г.А. Метод мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2016. Т. 12, № 1. С. 85–93. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-12-1-85-93.
24. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Баннов Ю.А., Анисимова Н.Г. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв на платформенных территориях (на примере г. Москвы) // Сергеевские чтения. Выпуск 10. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии: матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (Москва, 20-21 марта 2008 г.). М.: ГЕОС, 2008. С. 235–240.
25. Микляев П.С., Маренный А.М., Цапалов А.А., Пенезев А.В. Результаты мониторинга параметров радонового поля на экспериментальных площадках // Евразийский Союз Ученых. 2015. № 1-1 (18). С. 155–159.
26. Климшин А.В., Козлова И.А., Рыбаков Е.Н., Луковской М.Ю. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 146–151.
27. Gavriliev S., Petrova T., Miklyaev P. Factors influencing radon transport in the soils of Moscow // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29, No. 59. P. 88606–88617. DOI: 10.1007/s11356-022-21919-y.
28. Butkus D., Gagiškis A., Streckytė E., Grubliauskas R. The measuring of radon volumetric activity and exhalation rate in ground-level air // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2013. Vol. 295. P. 1085–1092. DOI: 10.1007/s10967-012-1922-8.
29. Зайцев В.В., Роголис В.С., Кузьмич С.Г. Исследования влияния временных условий на потоки радона на строительных площадках // АНРИ. 2008. № 2. С. 34–36.
30. Белецкая Ю.В., Крупный Г.И., Мамаев А.М., Расцветалов Я.Н. Вариации плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона // АНРИ. 2010. № 1. С. 34–37.
31. Tsapalov A., Kovler K., Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. Vol. 160. P. 28–35. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.016.
32. Зуевич Ф.И., Довгуша В.В., Шкрабо И.В. и др. Взаимная корреляция солнечной активности и потока радона с поверхности грунтов // Экологические системы и приборы. 2008. № 10. С. 14–16.
33. Маренный А.М., Микляев П.С., Петрова Т.Б. и др. Временные флуктуации плотности потока радона на территории Москвы // АНРИ. 2011. № 1. С. 23–36.
34. Яковлева В.С. Особенности совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности пористых материалов // АНРИ. 2010. № 4. С. 31–37.
35. 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.
36. ISO 11665-7:2012. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 7: Accumulation method for estimating surface exhalation rate. Geneva: International Organization for Standardization, 2012. 23 p.
37. Рыжакова Н.К., Шилова К.О. Пат. № 2656131, Российская Федерация, МПК G01T1/167. Способ оценки радоноопасности участков застройки. Заявл. 01.06.2017. Опубл. 31.05.2018 Бюл. № 16.
38. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Жуковский М.В. Метод измерения плотности потока радона из грунта, активированного градиентом давления // АНРИ. 2018. № 2. С. 48–55.
39. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Zhukovsky M. Method for measuring radon flux density from soil activated by a pressure gradient // Radiation Measurements. 2018. Vol. 119. P. 150–154. DOI: 10.1016/j.radmeas.2018.10.011.
40. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Юрков И.А. Метод оценки радоноопасности участка с учетом потенциальной адвективной составляющей потока радона // Актуальные вопросы радиационной гигиены: матер. всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (Санкт-Петербург, 10-11 октября 2023 г.). СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2023. С. 315–318.
41. Рыжакова Н.К., Ставицкая К.О., Удалов А.А. Новый подход к проблеме оценки радоноопасности участков застройки // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 57–64. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-57-64.
42. Бахур А.Е., Мануилова Л.И., Овсянникова Т.М. О возможности оценки потенциальной радоноопасности территорий по содержанию Po-210 и Pb-210 в почвах, грунтах и осадочных породах // АНРИ. 2009. № 3. С. 21–26.
43. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Макеев В.М., Климшин А.В. Аномалии плотности потока радона на территории Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 5. С. 39–47.
44. Чеховский А.Л., Дроздов Д.Н. Картирование территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей по комплексному радоновому показателю и объемной активности радона в жилых зданиях // Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 4. С. 126–136. DOI: 10.21870/0131-3878-2016-25-4-126-136.
45. Чеховский А.Л., Чеховская Д.В. Обоснование модели комплексного радонового показателя, используемой для

- определения объемной активности радона в жилых зданиях // АНРИ. 2019. № 4. С. 51–56.
46. Чеховский А.Л. Обоснование применения компонентов радонового показателя для картирования радонового потенциала // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. 2014. № 6 (87). С. 100–106.
47. Neznal M., Neznal M., Matolín M., et al. The new method for assessing the radon risk of building sites. Prague: Czech Geological Survey, 2004. 94 p.
48. Clavensjö B., Åkerblom G. The Radon Book – measures against radon. Stockholm: Ljunglöfs Offset AB, 1994. 129 p.
49. Андреев А.И., Тесленко И.М., Цыцарева М.Б. Вариации почвенного радона и плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона // Вестник ТОГУ. 2014. № 3. С. 113–122.
50. Бондаренко В.М., Демин Н.В., Соболев А.И. Квадратичная зависимость плотности потока радона с земной поверхности от объемной активности подпочвенного радона // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 6. С. 54–59.
51. Szabó K.Z., Jordan G., Horváth Á., Szabó C. Dynamics of soil gas radon concentration in a highly permeable soil based on a long-term high temporal resolution observation series // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 124. P. 74–83. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.04.004.
52. Müllerová M., Holý K., Bulko M. Daily and seasonal variations in radon activity concentration in the soil air // Radiation Protection Dosimetry. 2014. Vol. 160, No. 1-3. P. 222–225. DOI: 10.1093/rpd/ncu087.
53. Козлова И.А., Юрков А.К. Влияние атмосферного давления на поведение почвенного радона в массиве горных пород // АНРИ. 2008. № 2. С. 28–31.

Поступила: 26.06.2024

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

ORCID: 0000-0002-1277-3807

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

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

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: 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

A review of approaches to assessment of potential radon hazard of land plots

Alexey S. Vasilyev, Dmitry V. Kononenko, Tatyana A. Kormanovskaya, 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

According to Rosstat statistics, in recent years there has been a tendency in the Russian Federation to increase the intensity of construction, while both the number of buildings put into operation and their total area are increasing. The assessment of the potential radon hazard of land plots for construction provides the possibility of timely inclusion of the necessary protective (preventive) measures against radon in the design of buildings. This is a legal requirement in cases where the density of radon flux from the ground surface within the building area exceeds the established hygienic standards (action levels). The paper presents a review of Russian and foreign approaches to assessing the potential radon hazard of land plots conducted within the framework of engineering and environmental surveys. The current regulatory requirements to

Alexey S. Vasilyev

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia. E-mail: a.vasilev@niirg.ru

radiation safety indicators of land plots for construction of residential, public and industrial buildings and facilities in the Russian Federation are analyzed. The main drawbacks of the algorithm for determining the potential radon hazard of land plots, used in the current guidelines MU 2.6.1.2398-08 approved at the federal level more than 15 years ago, are described. Critical remarks (the unsuitability of the value of density of radon flux from the ground surface for designing radon protective and mitigation (remedial) measures, lack of consideration of seasonal variations of radon flux density, etc.) accumulated over the years as a result of practical application of these guidelines are presented. Benefits and drawbacks of foreign approaches to assessing the potential radon hazard of the territory based on the results of measurements of radon concentration in soil gas, as well as the very possibility of a transition in Russian regulations from the density of radon flux from the ground surface to the radon concentration in soil gas, are analyzed. Some rational proposals of various Russian research teams on improving the algorithm for determining the potential radon hazard of land plots are considered.

Key words: radon, radon flux density, radon concentration, radon in soil gas, radiation survey, engineering environmental survey, land plots, charcoal canister, open chamber.

Authors' personal contribution

A.S. Vasilyev wrote the draft of the manuscript, conducted a search and analysis of literature data, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

D.V. Kononenko conducted a search and analysis of literature data, translated the manuscript, and edited the interim version of the manuscript.

T.A. Kormanovskaya analyzed the current requirements to the radiation safety of land plots for construction of residential, public and industrial buildings and facilities, and edited the interim version of the manuscript.

K.A. Saprykin edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts 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

- Miklyayev P. “WHAT TO DO?” or “Radon crisis” in radiation surveys (impressions from reading the paper by Yu.A. Bannov “Laboratory of radiation control GEOCON LLC. Two years: work experience”). *ANRI=ANRI*. 2005;3: 60–64. (In Russian).
- Miklyayev PS, Makarov VI, Dorozhko AL, Petrova TB, Marenniy MA, Marenniy AM, et al. Radon field of Moscow. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya = Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2013;2: 172–187. (In Russian).
- Yakovleva VS. Methods for measuring radon and thoron flux density from the surface of porous materials. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University; 2011. 174 p. (In Russian).
- 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-2024-17-2-138-147.
- Vasilyev AS. Exposure of students (pupils) and employees of educational institutions in the Leningrad region to natural sources of radiation. Part 1: Results of a comprehensive survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 65–77. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.
- Kormanovskaya TA, Istorik OA, Romanovich IK, Eremina LA, Koroleva NA, Balabina TA, et al. Radon surveys in the buildings of children institutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 6–20. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
- Construction in Russia. 2022 Statistical digest. Moscow: Rosstat; 2022. 148 p. Available from: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Stroit_2022.pdf [Accessed 26 June 2024]. (In Russian).
- Miklyayev P, Petrova T, Klimshin A, Smirnova A. Mapping the geogenic radon potential (for example, the City of Moscow). *ANRI=ANRI*. 2015;1: 2–13. (In Russian).
- Gulabyants L, Kalaydo A. Radon protection of residential and public buildings. Moscow: Berlin: DirectMEDIA; 2020. 236 p. (In Russian).
- Tsapalov A, Miklyayev P, Petrova T, Kuvshinnikov S. Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation. *ANRI=ANRI*. 2024;1: 3–29. (In Russian) DOI: 10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.
- Marenniy AM, Okhrimenko SE, Pavlov IV. Objectives and methods of assessing the potential radon hazard of residential areas. *ANRI=ANRI*. 2006;2: 25–30. (In Russian).
- Bannov YuA. Laboratory of radiation control GEOCON LLC. Two years: work experience. *ANRI=ANRI*. 2005;2: 54–72. (In Russian).
- Gulabyants LA, Zabolotskiy BYu. Radon flux density as a criterion for assessing radon hazard. *ANRI=ANRI*. 2004;3: 16–20. (In Russian).
- Miklyayev PS, Petrova TB. Mechanisms of formation of radon flux from the soil surface and approaches to assessing the radon hazard of residential areas. *ANRI=ANRI*. 2007;2: 2–16. (In Russian).
- Miklyayev P, Petrova T, Tsapalov A, Borisov A. Application experience of the isotope geochemical method to study the condition of radon migration to the soil surface. *ANRI=ANRI*. 2012; 1: 15–21. (In Russian).
- Miklyayev P, Marenniy A, Tsapalov A, Petrova T. The comprehensive monitored research of the formation of the radon fields in the massifs of soil. Part 8 – the main results. *ANRI=ANRI*. 2017;4: 2–22. (In Russian).
- Okhrimenko SE, Korenkov IP, Miklyayev PS, Prokhorov NI, Verbova LF, Orlov YuV. Ranking of the territory of the city of Moscow for potential radon danger. *Gigiena i Sanitaria = Hygiene and Sanitation*. 2017;96(3): 211–216. (In Russian). DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-3-211-216.
- Miklyayev PS, Petrova TB, Okhrimenko SE. New aspects of assessing the radon hazard of construction sites on the example of Moscow. *ANRI=ANRI*. 2003;4: 63–71. (In Russian).
- Miklyayev PS, Petrova TB, Marenniy MA, Marenniy AM, Dorozhko AL, Makeev VM. The map of the flux density of radon on the territory of Moscow. *ANRI=ANRI*. 2012;3: 15–24. (In Russian).
- Ryzhakova NK, Stavitskaya KO, Udalov AA. Issues in assessment of potential radon hazard at building sites. *Radi-*

- atsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 37–44. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-37-44.
21. Marennyy AM. Radon in the framework of engineering and environmental surveys for construction. *ANRI=ANRI*. 2008;2: 21–28. (In Russian).
 22. Bannov Yu. Radiation control laboratory “Stalker” JSC: 10 years experience. *ANRI=ANRI*. 2013;4: 72–88. (In Russian).
 23. Yakovleva VS, Nagorskiy PM, Yakovlev GA. Method of monitoring of undisturbed radon flux density from the soil surface. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*. 2016;12(1): 75–82. DOI: 10.18454/2313-0156-2016-12-1-75-82.
 24. Miklyaev PS, Petrova TB, Bannov YuA, Anisimova NG. Mechanisms of formation of radon flux from the soil surface in platform territories (on the example of Moscow). In: Sergeev readings. Issue 10. International Year of Planet Earth: challenges of geocology, engineering geology and hydrogeology. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the RAS on problems of geocology, engineering geology and hydrogeology, 20–21 March 2008, Moscow. Moscow: GEOS; 2008. P. 235–240. (In Russian).
 25. Miklyaev PS, Marennyy AM, Tsapalov AA, Penezhev AV. Results of monitoring of radon field parameters at experimental sites. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh = Eurasian Union of Scientists*. 2015;1-1(18): 155–159. (In Russian).
 26. Klimshin AV, Kozlova IA, Rybacov EN, Lukovskoy MY. Effect of freezing the surface layer of soil on the radon transport. *Bulletin KRASEC. Earth Sciences*. 2010;2: 146–151. (In Russian).
 27. Gavriliev S, Petrova T, Miklyaev P. Factors influencing radon transport in the soils of Moscow. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(59): 88606–88617. DOI: 10.1007/s11356-022-21919-y.
 28. Butkus D, Gagiškis A, Streckytė E, Grubliauskas R. The measuring of radon volumetric activity and exhalation rate in ground-level air. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013;295: 1085–1092. DOI: 10.1007/s10967-012-1922-8.
 29. Zaytsev VV, Rogalis BC, Kuzmich SG. Studies of the influence of time conditions on radon fluxes at construction sites. *ANRI=ANRI*. 2008;2: 34–36. (In Russian).
 30. Beletskaya YuV, Krupnyy GI, Mamaev AM, Rastsvetalov YaN. Variations in the density of radon flux from the soil surface of the experimental land plots. *ANRI=ANRI*. 2010;1: 34–37. (In Russian).
 31. Tsapalov A, Kovler K, Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016;160: 28–35. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.016.
 32. Zuevich FI, Dovgusha VV, Shkrabo IV, Lazarev AV, Voronin LA. Correlation of radon exhalation flux from the soil surface and solar activity. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*. 2008;10: 14–16. (In Russian).
 33. Marennyy AM, Miklyaev PS, Petrova TB, Marennyy MA, Penezhev AV, Kozlova NV. Time fluctuations of radon flux in territory of Moscow. *ANRI=ANRI*. 2011;1: 23–36. (In Russian).
 34. Yakovleva VS. Features of simultaneous measurements of radon and thoron flux densities from the surface of porous materials. *ANRI=ANRI*. 2010;4: 31–37. (In Russian).
 35. 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.
 36. ISO 11665-7:2012. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 7: Accumulation method for estimating surface exhalation rate. Geneva: International Organization for Standardization; 2012. 23 p.
 37. Ryzhakova NK, Shilova KO. Pat. No. 2656131, Russian Federation, Int. Cl. G01T 1/167. Method for evaluation of radon hazard at areas of construction. Appl. 01.06.2017. Publ. 31.05.2018 Bull. № 16.
 38. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Method for measuring radon flux density from soil activated by a pressure gradient. *ANRI=ANRI*. 2018;2: 48–55. (In Russian).
 39. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Method for measuring radon flux density from soil activated by a pressure gradient. *Radiation Measurements*. 2018;119: 150–154. DOI: 10.1016/j.radmeas.2018.10.011.
 40. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Yurkov IA. A method for assessing the radon hazard of a site, taking into account the potential advective component of the radon flux. In: Current issues of radiation hygiene. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, 10–11 October 2023, St. Petersburg. St. Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2023. P. 315–318. (In Russian).
 41. Ryzhakova NK, Stavitskaya KO, Udalov AA. A new approach to the problem of assessing the radon hazard of building sites. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 57–64. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-57-64.
 42. Bakhur AE, Manuilova LI, Ovsyannikova TM. On the possibility of assessing the potential radon hazard of territories using activity concentrations of Po-210 and Pb-210 in soils and sedimentary rocks. *ANRI=ANRI*. 2009;3: 21–26. (In Russian).
 43. Miklyaev PS, Petrova TB, Makeev VM, Klimshin AV. Abnormal radon exhalation rate in Moscow. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya = Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2017;5: 39–47. (In Russian).
 44. Chekhovskiy AL, Drozdov DN. Mapping territory of Gomel, Mogilev and Vitebsk regions for complex radon index and radon volume activity in residential buildings. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2016; 25(4): 126–136. (In Russian) DOI: 10.21870/0131-3878-2016-25-4-126-136
 45. Chekhovskiy AL, Chekhovskaya DV. Substantiation of model of complex radon index used to determine volumetric activity of radon in residential buildings. *ANRI=ANRI*. 2019;4: 51–56. (In Russian).
 46. Chekhovskiy AL. Justification for the use of the components of radon index for radon potential mapping. *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2014;6 (87): 100–106. (In Russian).
 47. Neznal M, Neznal M, Matolin M, Barnet I, Miksova J. The new method for assessing the radon risk of building sites. Prague: Czech Geological Survey; 2004. 94 p.
 48. Clavensjö B, Åkerblom G. The Radon Book – measures against radon. Stockholm: Ljunglöfs Offset AB; 1994. 129 p.
 49. Andreev AI, Teslenko IM, Cicareva MB. Variations of ground radon and density of radon stream from the ground surface of experimental polygon. *Vestnik TOGU = Bulletin of PNU*. 2014;3: 113–122. (In Russian).
 50. Bondarenko VM, Demin NV, Sobolev AI. Quadratic dependence of radon surface flow density on volumetric activity of subsurface radon. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka = Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2009;6: 54–59. (In Russian).
 51. Szabó KZ, Jordan G, Horváth Á, Szabó C. Dynamics of soil gas radon concentration in a highly permeable soil based on a long-term high temporal resolution observation series. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;124: 74–83. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.04.004.
 52. Müllerová M, Holý K, Bulko M. Daily and seasonal variations in radon activity concentration in the soil air. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014;160(1-3): 222–225. DOI: 10.1093/rpd/ncu087.
 53. Kozlova IA, Yurkov AK. Influence of atmospheric pressure on the behavior of soil radon in a rock mass. *ANRI=ANRI*. 2008;2: 28–31. (In Russian).

Received: June 26, 2024

For correspondence: 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 (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: a.vasilev@niirg.ru)

ORCID: 0000-0002-1277-3807

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

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

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: Vasilyev A.S., Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Saprykin K.A. A review of approaches to assessment of potential radon hazard of land plots. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 142-153. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-142-153

Рецензия на монографию «Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития» (под общ. ред. Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой)

В Российской Федерации вместе со сложившейся системой оценки радиационного риска активно развивается анализ риска здоровью, связанного с воздействием подавляющего большинства факторов среды обитания: химических, физических, биологических, в том числе профессиональных и образа жизни. Именно этой теме и посвящено второе издание монографии «Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития» под общей редакцией академиков РАН Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. В ней детально описывается история формирования методов оценки риска здоровью с акцентом на их совершенствование в последнем десятилетии, даются подходы к использованию полученных результатов в управлении рисками, приведены примеры их применения для задач государственного социально-экономического развития.

Второе издание монографии выпущено через 10 лет после выхода первого, пользовавшегося заслуженным вниманием со стороны специалистов, и состоявшего из одного тома. За прошедшие с момента выхода первого издания годы произошло существенное развитие и активное внедрение в практику профилактической медицины методологии оценки риска здоровью, накоплен значительный опыт применения данной методологии для целей сохранения здоровья населения. Риск-ориентированный подход прочно занял свое место в контрольно-надзорной деятельности при обеспечении санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Всё это и послужило предпосылкой для переработки монографии и её расширения. Издание дополнено, в том числе за счет рассмотрения в нем вопросов цифровизации методологии анализа риска, таких как создание автоматизированных информационных систем и формирование баз знаний.

Второе издание разделено на два тома объемом 580 и 468 страниц, которые включают в себя 11 глав и 7 приложений.

В первом томе авторы подробно описывают теоретические основы анализа риска здоровью и методологические аспекты оценки риска и его эволюции при воздействии на здоровье факторов среды обитания различной природы, условий и образа жизни, рассматривают подходы к моделированию нарушений функций критических органов и систем при воздействии факторов риска, методические аспекты управления рисками здоровью.

Во втором томе рассматриваются методические основы риск-коммуникаций, правовые основы анализа риска в России и за рубежом, вопросы оптимизации социально-гигиенического мониторинга на основе оценки риска здоровью, методология, методика и практика доказательства вреда здоровью, причиненного негативным воздействием факторов риска, практика оценки и управления рисками здоровью на базе новых методов и подходов, интегрированное решение анализа риска здоровью в решении стратегических задач государственного социально-экономического развития.

Относительно первой редакции авторами добавлено две главы. В главе 3 приводятся результаты математического моделирования нарушений функций антропогенной системы. В главе 9 представлен готовый для использования на практике алгоритм проведения санитарно-эпидемиологических исследований, направленных на выявление связи нарушений здоровья с качеством объектов среды обитания.

Важным является раздел, посвященный вопросам риск-коммуникации, доказательно демонстрирующий значимость информационного взаимодействия с населением в комплексе мероприятий анализа риска здоровью.

В обсуждении правовых основ анализа риска в сфере охраны среды обитания авторами отдельно подчеркивается, что в законодательном аспекте в государствах – членах ЕАЭС в наибольшей степени методология оценки риска здоровью гармонизирована в области обеспечения радиационной безопасности населения. В законодательных актах используются практически идентичные формулировки, а принципы регулирования допустимых уровней радиационного воздействия основаны на принципах оценки риска здоровью.

В монографии авторы доказательно идентифицируют анализ риска здоровью как неотъемлемую часть гигиенической науки, позволяющую осуществлять прогнозирование изменений популяционного здоровья, как негативных в условиях воздействия факторов опасности, и позитивных в результате реализации профилактических мероприятий.

В рецензируемом издании отчетливо показана роль применения цифровых технологий прогнозирования величин рисков, особенно при ситуационном моделировании. Приведены успешные примеры реализации этих подходов на популяционном и персональном уровнях, что позволяет устанавливать отдельные механизмы формирования риска у человека под воздействием отдельных факторов среды обитания и их комплексов, а также давать пространственно-динамические закономерности распределения таких рисков.

Авторами монографии освещены разнообразные способы управления рисками здоровью населения от обоснования по критериям допустимого риска гигиенических нормативов содержания химических веществ и биологических агентов в пищевой продукции и объектах среды обитания до разработки и реализации программ медико-профилактических мероприятий. Особый интерес представляет методология выделения приоритетных объектов для плановых контрольно-надзорных мероприятий на базе риск-ориентированной модели.

В итоге авторы представляют основные направления совершенствования политики государства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения в современных условиях, раскрывают роль анализа риска здоровью в формировании стратегии государ-

ственного социально-экономического развития страны, выделяя при этом наиболее инновационные технологии оценки, управления риском и информирования о нем. Содержание представленной монографии свидетельствует о том, что базирующаяся на научно обоснованной теоретической платформе практика применения анализа рисков в целях достижения национальной безопасности, укрепления и сохранения трудового потенциала государства и является действенным инструментом обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения.

Таким образом, рецензируемая пересмотренная и дополненная монография является уникальным трудом, полностью отражающим актуальное положение в области анализа риска здоровью и применение его результатов в обосновании реализации стратегии государственного социально-экономического развития России. Ее можно рекомендовать для специалистов в области профилактической медицины и гигиены, государственного и муниципального управления, работников научных и образовательных учреждений.

Рецензирование монографии проведено:

– директором Федерального бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, д.м.н., профессор, академик РАН И.К. Романовичем;

– руководителем информационно-аналитического центра Федерального бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия А.М. Библиным.

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 интервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева – 2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

СТРУКТУРА СТАТЬИ

Титульный лист должен содержать:

- **название статьи** должно кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В него необходимо вложить как информативность, так и привлекательность, уникальность научного творчества автора. Не допускается использование сокращений и аббревиатур, а также торговых (коммерческих) названий приборов, медицинской аппаратуры и т.п.);

Приводится на русском и английском языках.

- **фамилия и инициалы автора(ов);**

- любые изменения в списке авторов после подачи статьи в редакцию должны быть одобрены всеми авторами.

Фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru.

- **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:

- 1) Введение (Introduction): ставится научная проблема и цель статьи.

- 2) Материалы и методы (Materials and Methods): даются сведения об объекте и последовательности выполнения исследования.

- 3) Результаты исследования и обсуждение (Results and Discussion): приводятся конкретные авторские результаты исследования.

- 4) Обсуждение и заключение (Discussion and 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 исследования», «Обсуждение и заключение», «Литература».

Введение (Introduction) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности. Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье. При его написании автор прежде всего должен заявить общую тему исследования, обозначить проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме того, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы. Обзор литературы. Необходимо описать основные современные исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья. Желательно рассмотреть 20–40 источников и сравнить взгляды авторов; часть источников должна быть англоязычной. Важно провести сравнительный анализ с зарубежными публикациями по заявленной проблематике.

В разделе **«Материалы и методы» (Materials and Methods)** должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

Если в статье имеется описание наблюдений на человеке, не используйте фамилии, инициалы больных или номера историй болезни, особенно на рисунках или фотографиях. При изложении экспериментов на животных укажите, соответствовало ли содержание и использование лабораторных животных правилам, принятым в учреждении, рекомендациям национального совета по исследованиям, национальным законам.

Все радиационные единицы следует приводить в международной системе единиц измерения (СИ) (см.: ГОСТ – 8.417 – 81 ГСИ. Единицы физических величин»; В.И. Иванов В.П. Машкович, Э.М. Центр. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

При описании методики исследования можно ограничиться указанием на существо применяемого метода со ссылкой на источник заимствования, в случае модификации – указать, в чем конкретно она заключается. Оригинальный метод должен быть описан полностью.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion). В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого – доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты желательно сопоставить с предыдущими работами в этой области, как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективности. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

При первом упоминании терминов, неоднократно используемых в статье (однако не в заголовке статьи и не в резюме), необходимо давать их полное наименование и сокращение в скобках, в последующем применять только сокращение, однако их применение должно быть сведено к минимуму. Сокращение проводится по ключевым буквам слов в русском написании, например: источник ионизирующего излучения (ИИИ) и т. д. Тип приборов, установок следует вводить на языке оригинала, в кавычках; с указанием (в скобках) страны производителя. Например: использовали спектрофотометр «СФ16» (Россия), спектрофлуориметр фирмы «Hitachi» (Япония). Малоупотребительные и узкоспециальные термины также должны быть расшифрованы.

Таблицы

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 вариальности 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 рисунков 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 т. д. 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, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

В конце статьи должны быть размещены следующие данные:

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей. Наш журнал придерживается следующих критериев авторства, разработанных ICMJE и COPE:

Журнал «Радиационная гигиена» принимает следующие критерии авторства:

1) существенный вклад в разработку концепции или планирование научной работы либо в получении, анализе или интерпретации данных работы;

2) составление черновика рукописи или его критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания;

3) окончательное утверждение публикуемой версии рукописи;

4) согласие принять на себя ответственность за все аспекты работы и гарантия того, что все вопросы, связанные с точностью и добросовестностью любой части работы, могут быть надлежащим образом исследованы и урегулированы.

В список авторов не включаются люди, не являющиеся авторами статьи. Имена людей, которые не являются авторами, не отвечают всем четырем критериям, но оказали иную поддержку, указывают в разделе «Благодарности».

Приводятся на русском и английском языках.

Благодарности. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Приводятся на русском и английском языках.

Информация о конфликте интересов. В статье следует указать на реальный или потенциальный конфликт интересов. Если конфликта интересов нет, то следует написать, что автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Приводится на русском и английском языках.

Сведения об источнике финансирования.

Приводятся на русском и английском языках.

Список литературы

Рекомендуемое количество литературных источников: для оригинальных научных статей – не менее 25 источников, для лекций и обзоров – не более 60 источников, для других статей – не более 15 источников.

Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.

В журнале используется Ванкуверский формат цитирования, который подразумевает ссылку на источник литературы в квадратных скобках и последующее упоминание источников в списке литературы и в порядке упоминания в тексте.

Прилагаются **два списка литературы.**

В первом списке литературы (Литература) библиографическое описание литературных источников должно соответствовать требованиям ГОСТа Р 7.0.5-2008

«Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Необходимо правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи, должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В списке литературы не следует указывать постановления, законы, санитарные нормы и правила, другие нормативно методические документы. Указания на них следует размещать в сносках или внутритекстовых ссылках. Сноски и внутритекстовые ссылки следует представить и на английском языке, написав после английского описания язык текста (In Russ.).

Примеры внутритекстовых ссылок:

.....согласно Норм радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) [перевод на английский язык (In Russ.)]. Илисогласно ГОСТ Р 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

Подстрочные ссылки (сноски):

¹ СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

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

ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

Если имеется 3–4 автора, то указываются все. Если от 5 и больше – первые 3 автора, затем ставится «и др.».

Если в **монографии** на обложке указаны основные авторы, их всех следует указать, далее поставив «и др.».

Книги и брошюры:

Сергеев И.В., Смирнова Т.П., Исаков М.Н. Лучевая диагностика в России. СПб.: НИИРГ, 2007. 123 с.

Jenkins P.F. Making sense of the chest xray: a handson guide.

New York: Oxford University Press; 2005. 194 p.

Iverson C., Flanagan A., Fontanarosa P.B. et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; 1998. 660 p.

Многотомные издания или на часть книги:

Пивинский Ю.Е. Общие вопросы технологии // Неформальные огнеупоры. М., 2003. Т. 1, кн. 1. С. 430-447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Основы общей патофизиологии // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. СПб.: ЭЛБИ, 1999. Ч. 1., гл. 2. С. 124–169.

Riffenburgh R.H. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447–86.

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. 553–98.

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., Цагалов 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., Сеницын 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., Сосякин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. 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. Иностраные 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

Petitti DB, Crooks VC, Buckwalter JG, Chiu V. Blood pressure levels before dementia. Arch Neurol. 2005 Jan;62(1):112-6.

Статья 7 и более авторов (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»)

Hallal AH, Amortegui JD, Jeroukhimov IM, Casillas J, Schulman CI, Manning RJ, et al. Magnetic resonance cholangiopancreatography accurately detects common bile duct stones in

resolving gallstone pancreatitis. J Am Coll Surg. 2005 Jun;200(6): 869-75.

Статья в электронном журнале

Erami 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. Am J Sports Med [Internet]. 2012 Dec;40(12): 2872-8. 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 [Internet]. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <http://ezproxy.lib.monash.edu.au/login?url=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 [Internet]. Canberra ACT: Diabetes Australia: Available from: <http://www.diabetesaustralia.com.au/en/Understanding-Diabetes/DiabetesGlobally/> [Accessed Nov 5 2012].

European Space Agency. Rosetta: rendezvous with a comet. Available from: <http://rosetta.esa.int> [Accessed 15 June 2015].

Из сборника конференций (тезисы)

Wittke M. Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rock. In: Van Cotthem A, Charlier R, Thimus J-F, Tshibangu J-P. (eds.) Eurock 2006: multiphysics coupling and longterm behaviour in rock mechanics: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9-12 May 2006, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211-216.

Стандарт

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Structural fire design. London: BSI; 2005.

Методические рекомендации/руководство

National Institute for Health and Care Excellence (NICE), Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-is-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 РФ, между авторами статей и редакцией журнала заключается **Лицензионный договор (оферта) о предоставлении права использования произведения** издателя.

ПОЛНЫЙ ТЕКСТ АВТОРСКОГО ДОГОВОРА (ОФЕРТЫ) — СКАЧАТЬ

Основным способом подачи рукописи статьи в редакцию является отправка по электронной почте журнала в форме присоединенных файлов: journal@niirg.ru

При подаче рукописи должны быть загружены следующие файлы:

1. Текст рукописи (титульный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том

же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате Tiff, JPEG с разрешением 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, 2334283.