

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 16 № 4, 2023



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

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

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

Задачи журнала:

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

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

Корректор А.М. Плаксына
Компьютерная верстка
А.В. Гнездиловой

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 15.12.2023
Формат 60x84/8. Печать офсетная. 20,5 печ.л.

Тираж 150 экз.

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов П.И.
394052, г.Воронеж, ул. Маршала Неделкина, д.27, кв. 56
© «Радиационная гигиена», 2023

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

Научно-практический журнал

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

Издается ежеквартально.

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

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

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



Том 16 № 4, 2023

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

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

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

Бузинов Роман Вячеславович — ФБУН «СЗНЦ 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, чл.-корр. РАН (Обнинск, Российская Федерация)

Ильин Леонид Андреевич — ФГБУ ГНЦ «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, д.м.н., профессор, академик РАН (Москва, 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 — ФБНУ «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)

Вакуловский Сергей Мстиславович — Институт проблем мониторинга окружающей среды (ИПМ) ФГУ НПО «Тайфун», д.т.н., профессор (Обнинск, 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)

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 A.M. Plaksina
Computer layout A.V. Gnezdilova

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@niiirg.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”, doctor of medical sciences, docent, honorable physician of the Russian Federation (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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, Tajikistan Republic)

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, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Obninsk, Russian Federation)

Leonid A. Ilyin — Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia after A.I. Burnasyan, M.D., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

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

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

Genrikh A. Sofronov — Federal State Scientific Organization «Institute of Experimental Medicine», Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Medical Sciences, (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, Doctor of Medical Sciences, Professor, Honoured Doctor of the Russian Federation, Medical Major General of the Reserve (Moscow, Russian Federation)

Editorial Board

Aleksandr V. Alekhovich — Russian Medical Academy of Post-graduate Education, MD, Professor (Moscow, Russian Federation)

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

Natalya I. Sanzharova — All-Russia Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, The Federal Agency for Scientific Organizations, Doctor of Biology, 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)

Sergey M. Vakulovsky — Federal State Budgetary Institution Research and Production Association «Typhoon», Doctor of Engineering, Professor (Kaluga region, Russian Federation)

Aleksandr V. Vodovатов — Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, PhD (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

Vasiliy 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 Medicine (Saint Petersburg, Russian Federation)

Victor S. Repin — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Doctor of Biology (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 16 № 4, 2023

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я., Варфоломеева К.В., Дроздова Е.А., Жеско Т.В., Кадука М.В., Кормановская Т.А., Кравцова О.С., Кудряшов А.В., Ладик А.А., Лалаян В.А.
Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации.
Часть 2: Структура рационов питания населения7

Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Репин В.С.
Разработка автоматизированной системы анализа радиационных рисков: цели, задачи и перспективы развития22

Капырина Ю.Н., Водоватов А.В., Пузырев В.Г., Комиссаров М.И., Алешин И.Ю., Голиков В.Ю., Орел В.И.
Оценка эффективных доз при проведении баллонной пластики пищевода у детей32

Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф.
Накопление ¹³⁷Cs экологическими группами прибрежно-водной растительности пойменных лугов реки Сож44

Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Репин В.С.
Структура потребления лесных грибов жителями загрязненных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС55
Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю., Ильин В.А.
Сравнение эффективных доз персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных и в нестационарных условиях64

ОБЗОРЫ

Перевошчиков Р.Д., Перевошчикова А.А., Меньшикова Е.А.
Влияние добывающих и топливно-энергетических предприятий на радиационный фон территорий70
Цапалов А.А., Киселев С.М., Ковлер К.Л., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Жуковский М.В., Яромошенко И.В., Маренный А.М., Тутельян О.Е., Кувшинников С.И.
Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия84

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Братилова А.А., Барковский А.Н.
Медицинское облучение пациентов за счет рентгенорадиологических диагностических процедур, проведенных в 2022 г. в медицинских организациях Российской Федерации 105

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

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. 122

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

Репин В.С., Рамзаев В.Л., Библин А.М., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Ильичев В.А., Касаткин А.В., Касаткин В.В.
Анализ возможностей оценки размеров охранных зон мирных ядерных взрывов на основе количественных закономерностей деформации земных недр 134

CONTENTS

Vol. 16 № 4, 2023

RESEARCH ARTICLES

Romanovich I.K., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Bruk G.Ya., Varfolomeeva K.V., Drozdova E.A., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kormanovskaya T.A., Kravtsova O.S., Kudryashov A.V., Ladik A.A., Lalayan V.A.
Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus.
Part 2: Population's food preferences (diet)..... 19

Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Repin V.S.
Development of the Automated System for Radiation Risk Analysis: goals, tasks and the vision for progress.....29

Kapryrina Yu.N., Vodovатов A.V., Puzyrev V.G., Komissarov M.I., Aleshin I.Yu., Golikov V.Yu., Orel V.I.
Assessment of effective doses for fluoroscopy-guided balloon dilatation of benign esophageal strictures in pediatric medicine..... 41

Daineko N.M., Timofeev S.F.
Accumulation of ¹³⁷Cs by ecological groups of coastal-aquatic vegetation of floodplain meadows of the Sozh river53

Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Repin V.S.
Consumption structure of forest mushrooms by residents of contaminated districts of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident.....62
Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Bogatyreva V.Yu., Ilyin V.A.
Comparison of effective doses for personnel performing flaw detection in stationary conditions and *in situ*68

REVIEWS

Perevoshchikov R.D., Perevoshchikova A.A., Menshikova E.A.
Impact of mining and fuel and energy enterprises on the radiation background of territories.....80
Tsapalov A.A., Kiselev S.M., Kovler K.L., Miklyaev P.S., Petrova T.B., Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Marennyy A.M., Tutelyan O.E., Kuvshinnikov S.I.
Standardization of indoor radon measurements based on rational criterion for conformity assessment..... 101

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

Bratilova A.A., Barkovsky A.N.
Medical exposure of patients from diagnostic X-ray examinations performed in medical organizations of the Russian Federation in 2022..... 120

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Gromov A.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Tutelyan O.E.
Comparative analysis of information on radiation accidents in the Russian Federation in 2010–2022 131

RADIATION SAFETY DURING DECOMMISSIONING OF NUCLEAR LEGACY SITES

Repin V.S., Ramzaev V.P., Biblin A.M., Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Ilyichev V.A., Kasatkin A.V., Kasatkin V.V.
Estimation of the protected zone sizes for peaceful nuclear explosions based on quantitative patterns of the Earth's interior deformation 145

СОДЕРЖАНИЕ

Том 16 № 4, 2023

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Кайдановский Г.Н., Шлеенкова Е.Н., Бажин С.Ю., Ильин В.А.,
Тарита В.А., Фирсанов В.Б.

**Инструментальное исследование доз облучения
и условий работы персонала рентгенохирургических
бригад..... 148**

НЕКРОЛОГ

Памяти Леонида Андреевича Ильина –
выдающегося советского и российского ученого
(1928–2023)..... 158

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 160

CONTENTS

Vol. 16 № 4, 2023

RADIATION MEASUREMENT

Kaidanovsky G.N., Shleenkova E.N., Bazhin S.Yu., Ilyin V.A.,
Tarita V.A., Firsanov V.B.

**Instrumental study of radiation doses and working
conditions for personnel
of X-ray surgical teams 156**

OBITUARY

In memory of Leonid Andreevich Ilyin – outstanding Soviet
and Russian scientific (1928–2023)..... 158

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS..... 160

Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации.

Часть 2: Структура рационов питания населения¹

И.К. Романович¹, А.Б. Базюкин¹, А.А. Братилова¹, **Г.Я. Брук¹**, К.В. Варфоломеева¹, Е.А. Дроздова¹, Т.В. Жеско¹, М.В. Кадука¹, Т.А. Кормановская¹, О.С. Кравцова¹, А.В. Кудряшов², А.А. Ладик², В.А. Лалаян²

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 Филиал Центра гигиены и эпидемиологии в городе Клинцы Брянской области, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Клинцы, Брянская область, Россия

В статье приводятся результаты радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области, полученные в 2019–2022 гг. в ходе реализации мероприятий «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС». Во второй части статьи изложены результаты изучения структуры рационов питания населения. Дана общая характеристика рационов питания жителей и выделены основные виды пищевых продуктов сельскохозяйственного производства и природного происхождения, наиболее активно потребляемые населением на современном этапе радиационной аварии. Оценены годовые объемы потребления жителями разных возрастных категорий пищевых продуктов местного производства (происхождения). Полученные результаты оценки уровней потребления пищевых продуктов сопоставлены с собственными результатами более ранних исследований и с современными результатами изучения рационов питания населения России и Беларуси. Установлено, что среди пищевых продуктов сельскохозяйственного производства, как и в прежние годы, к наиболее потребляемым продуктам относятся молоко и картофель, среди природных пищевых продуктов — грибы. Уровни потребления населением местных молочных продуктов и говядины за последние 10 лет сократились, а грибы и картофель жители потребляют в тех же объемах, что и прежде.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, население, внутренне облучение, рацион питания.

Введение

Изучение структуры рационов питания жителей радиоактивно загрязненных территорий является составной частью системы радиационной защиты населения и входит в программу радиационного мониторинга на всех фазах радиационной аварии [2]. Присутствие в составе аварийного выброса долгоживущих радионуклидов требует обновления сведений о рационе питания населения радиоактивно загрязненных территорий и в позднюю фазу аварии, поскольку с течением времени пищевые предпочтения населения могут изменяться.

Ограничительные меры в отношении потребления жителями территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) в 1986 г., пищевых продуктов местного производства (происхождения), принятые с целью снижения доз внутреннего облучения, изменили структуру рационов питания населения. В большей степени эти изменения затронули жителей сельских населенных пунктов (НП), чей уклад жизни тесно связан с потреблением продовольственной продукции местного происхождения [3, 4]. В особенности сократилось

¹ Продолжение. Начало статьи опубликовано в журнале «Радиационная гигиена», 2023. Т. 16, № 3 [1]. [The continuation. The beginning was published in the Radiation Hygiene in 2023 [1].]

Братилова Анжелика Анатольевна

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

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

потребление сельскохозяйственной продукции животного происхождения. Однако и после отмены ограничений объемы потребления населением, к примеру, мясомолочной продукции не вернулись к прежним уровням [4].

Изменение объемов производства населением сельскохозяйственной продукции в личных подсобных хозяйствах (ЛПХ) также связано с изменениями в экономической системе страны. Так, результаты современных исследований развития агропромышленного комплекса России указывают на сокращение доли продукции, произведенной в ЛПХ населения, за последние 10 лет практически в два раза: с 48% в 2010 г. до 27% в 2020 г. [5]. Экономическими причинами также объясняется и отрицательная динамика в объемах производства молочной продукции населением, характерная для 1990-х гг. [6].

Данная публикация является продолжением статьи, посвященной результатам работы 2019–2022 гг. по изучению современной радиационной обстановки на приграничных с Республикой Беларусь территориях РФ в ходе реализации мероприятий «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»². В предыдущей (первой) части статьи [1] была дана характеристика обследованных НП Брянской области, изложены сведения о продукции, производимой жителями в ЛПХ. В данной публикации приводятся результаты изучения современных рационов питания жителей.

Общая цель исследования – охарактеризовать современную радиационную обстановку в приграничных с Республикой Беларусь НП Брянской области и оценить уровни радиационного воздействия на население.

Цель исследования – изучить структуру рационов питания жителей НП и оценить современные уровни потребления населением местных пищевых продуктов.

Материалы и методы

В рамках реализации мероприятий Программы в 2019–2022 гг. было проведено радиационно-гигиеническое обследование НП юго-западных районов

Брянской области. Методы проведения комплексных радиационно-гигиенических обследований НП территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, изложены в документах МР 2.6.1.0006-10³ и МР 2.6.1.0007-10⁴. Базовая структура опросных карт населения приведена в этих же документах.

Изучение рационов питания населения проводилось по следующим основным группам пищевых продуктов местного производства (происхождения): молоко и молочные продукты, мясо сельскохозяйственных животных и птицы, овощи, рыба местных водоемов, лесные грибы и ягоды, мясо диких животных. Также учитывалось потребление того же типа продукции, приобретенной в торговой сети.

Уровни потребления жителями пищевых продуктов оценивали по результатам выборочного анкетирования. Выборочное исследование рационов питания населения (2970 чел. из 162 НП) проводили для 5 возрастных групп: взрослые (2457 чел.), дети в возрасте от 15 до 17 лет включительно (далее – подростки) (92 чел.), дети в возрасте от 7 до 14 лет включительно (далее – школьники) (296 чел.), дети в возрасте от 1 до 6 лет включительно, посещающие детские дошкольные учреждения (далее – дошкольники организованные) (97 чел.), дети в возрасте от 1 до 6 лет включительно, не посещающие детские дошкольные учреждения (далее – дошкольники неорганизованные) (28 чел.).

Населенные пункты отнесены к 2 типам⁵: НП первого типа⁶ (далее – НП типа I) – НП с численностью населения не более 10 тыс. человек, где большинство жителей имеет ЛПХ, и НП второго типа⁷ (далее – НП типа II) – городские НП с численностью населения от 10 до 100 тыс. человек, где жители значительную часть пищевых продуктов приобретают в торговой сети.

Обработка и статистический анализ данных проведены с использованием MS Excel, пакетов статистической обработки среды программирования R версии 4.1.2 (CRAN), пакета статистического анализа JASP версии 0.13. Принадлежности выборок к нормальному распределению

² Постановление Совета министров Союзного государства от 29 августа 2019 г. № 8 «О Программе совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» [Decree of the Council of Ministers of the Union State No. 8, August 29, 2019 "On the Program of joint activities of Russia and Belarus within the framework of the Union State to protect the population and rehabilitate territories affected by the disaster at the Chernobyl nuclear power plant" (In Russ.)].

³ МР 2.6.1.0006-10. Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения. Методические рекомендации. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 10 с. [MR 2.6.1.0006-10. Carrying out the comprehensive expeditionary radiation-hygienic survey of the settlement to assess the exposure doses to the public. Methodical guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor; 2010. 10 p. (In Russ.)]

⁴ МР 2.6.1.0007-10. Оценка доз облучения детей, проживающих на территориях, радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 27 с. [MR 2.6.1.0007-10. Assessment of exposure doses to children living in areas with radioactive contamination due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Methodical guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor; 2011. 27 p. (In Russ.)]

⁵ Методические указания МУ 2.6.1.2003-05 «Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». М., 2005. 16 с. [Methodological guidelines. The assessment of critical population groups average annual effective exposure doses in radioactively contaminated Russian Federation settlements after Chernobyl NPP accident (MG 2.6.1.2003-05), Moscow, 2005, 16 p. (In Russ.)]

⁶ В документе МУ 2.6.1.2003-05 определены как «Тип I» [It's named as "Type I" in MG 2.6.1.2003-05].

⁷ В документе МУ 2.6.1.2003-05 определены как «Тип II» [It's named as "Type II" in MG 2.6.1.2003-05].

определяли с использованием критерия Шапиро – Уилка. Проверку гипотезы о гомогенности дисперсий проводили с использованием критерия Левена. Для выявления различий нормально распределенных количественных данных использовали *t*-критерий в модификации Уэлча для независимых выборок. Определение различий для данных, не подчиняющихся нормальному распределению, проводили с использованием *U*-критерия Манна – Уитни, а при проведении множественных сравнений применяли в качестве предварительного статистического метода критерий Краскела – Уоллиса с апостериорным тестом межгрупповых различий по критерию Данна (коррекция Холма) с пересчетом критического уровня значимости ($p < 0,05$) на количество сравнений.

Результаты и обсуждение

Исследование структуры рационов питания населения общепринято проводится с отнесением домохозяйств к сельской или городской местности⁸. В основу такого разделения, как правило, положены демографические и социальные критерии. В исследованиях рационов питания населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению, к общепринятым критериям добавлен критерий, характеризующий вклад пищевых продуктов местного происхождения в общий объем потребления продуктов питания.

С учетом этих критериев, в нашем исследовании населенные пункты поделены на 2 категории: НП типа I и НП

типа II. К категории «НП типа I» отнесены 159 НП, численность населения в которых не превышает 10 тыс. человек и жители ведут сельский уклад жизни. К категории «НП типа II» отнесены города Клинцы и Новозыбков.

Формально численность населения в п. Климово в настоящее время превышает значение в 10 тыс. человек (составляет примерно 12 тыс. человек), однако значительная часть жителей имеют личные хозяйства. Сопоставление данных о потреблении взрослыми жителями этого НП основных пищевых продуктов с соответствующими данными о потреблении взрослыми жителями НП типа I и НП типа II показали большее отличие в отношении рационов жителей НП типа II, чем рационов НП типа I: при сравнении, к примеру, данных о потреблении картофеля жителями п. Климово было определено статистически значимое различие ($p < 0,01$) с соответствующими данными по НП типа II и не выявлено различия при сравнении с данными по НП типа I. Также определено статистически значимое различие между группами данных о потреблении жителями п. Климово и жителями НП типа II таких продуктов, как лесные грибы и ягоды, рыба местных водоемов ($p < 0,05$). В связи с этим было решено отнести п. Климово к категории НП типа I.

Структура рационов питания населения

По результатам опросов были оценены процентные доли жителей, чей рацион составляют местные сельскохозяйственные и природные пищевые продукты (табл. 1).

Доля населения, употребляющего пищевые продукты местного производства (происхождения), %

Таблица 1

Proportion of population consuming local foodstuffs, %

[Table 1]

Пищевые продукты [Foodstuffs]	НП типа I [Settlements "Type I"]	НП типа II [Settlements "Type II"]
Молочные продукты [dairy products]*	42	23
Свинина [pork]	80	58
Говядина [beef]	10	14
Мясо козы [goat meat]	2	< 1
Мясо кроликов [rabbit meat]	11	4
Мясо курицы [chicken meat]	55	32
Мясо водоплавающей птицы [duck meat, goose meat]	18	9
Яйца куриные [chicken eggs]	90	65
Картофель [potatoes]	99	93
Прочие овощи [vegetables]	96	82
Грибы лесные [mushrooms]	70	70
Ягоды лесные [forest berries]	59	58
Дичь [meat of game animals]	8	15
Рыба [fish]	48	49
Мед местных пчел [honey]	65	45

* Молоко и кисломолочные напитки [milk and sour milk drinks].

⁸ Основные методологические и организационные положения выборочного наблюдения рациона питания населения. Утверждены приказом Росстата от 03.10.2017 г. № 652 [The Methodology for Sampled the Structure of the Population's Diets, approved by the order of the Rosstat No.652 on 10/03/2017. (In Russ.)]

Большинство опрошенных жителей употребляют в пищу молочные продукты (89% населения НП типа I и 90% НП типа II), но молочные продукты из ЛПХ в НП типа I употребляет не более половины жителей, а в НП типа II – не более четверти (см. табл. 1). Из всех опрошенных жителей НП типа I, в чей рацион питания входят молоко коровье и кисломолочные напитки из него (81%), 34% употребляют данные продукты только из ЛПХ, а из торговой сети – 57% жителей. Из всех респондентов НП типа II, употребляющих в пищу молоко коровье и кисломолочные напитки (83%), 20% жителей предпочитают молоко только из ЛПХ, а 77% – только из торговой сети. Козье молоко входит в состав рациона меньшего числа респондентов. Из 160 НП типа I козье молоко употребляют только в 50. При этом доля употребляющих в пищу козье молоко жителей в этих НП варьирует от 2% до 83%. Из всего же населения, принявшего участие в исследовании, козье молоко и продукты его переработки употребляет 6% жителей НП типа I и 2,5% жителей НП типа II.

Наиболее употребляемыми из прочей продукции животноводства ЛПХ являются свинина, куриное мясо и куриные яйца. Говядину, произведенную в местных ЛПХ, употребляет не более 15% жителей. Мясо коз в рационе питания встречается только у 2% опрошенных жителей НП типа I и практически отсутствует в рационе жителей НП типа II.

Картофель местного производства присутствует в рационе практически всех жителей, так же, как и прочая овощная продукция. Сопоставимые значения по потреблению овощной продукции в НП разного типа (см. табл. 1) можно объяснить тем, что среди опрошенных жителей НП типа II 87% имеют подсобные хозяйства в пределах города или в городских окрестностях.

Сбор и заготовка лесных грибов и ягод среди населения всех типов НП пользуются практически равной популярностью. Из лесных грибов опрошенные жители отдают предпочтение белым грибам, лисичкам, маслятам, подберезовикам и подосиновикам, но также собирают грузди, рыжики, сыроежки, опята, рядовки (курочки и гусочки). Из лесных ягод в больших объемах собирают и заготавливают чернику – 76% от всего объема лесных ягод. Доля малины в ягодном компоненте рациона составляет 15%, земляники – 6%. Совместный вклад брусники, клюквы, лесной клубники и лесной вишни в ягодный компонент рациона составляет 3%. Только часть жителей употребляют в пищу мясо промысловых диких животных (дичи) – кабан, косуля, заяц, лось, утка, гусь, перепел, куропатка. Из совокупного объема потребляемого мяса дичи по 30% приходится на кабана и косулю (дикая коза), 15% – на зайчатину. Из пернатой дичи чаще в пищу употребляют мясо утки. Рыба местных водоемов присутствует в рационах питания половины жителей как НП типа I, так и НП типа II.

Исследования рационов питания сельских жителей территорий Республики Беларусь [7] показывают результаты, схожие с результатами нашего исследования в отношении потребления природных пищевых продуктов: 80% населения собирает и заготавливает грибы, 10% населения потребляет мясо диких животных. Также авторы отмечают незначительную долю населения, потребляющего мясо крупного рогатого скота (КРС) и коз, т.е. сельскохозяйственных животных с пастбищ-

ным периодом содержания. Практически полностью совпадает в долевым выражении количество жителей, потребляющих коровье и козье молоко из ЛПХ (40% опрошенных жителей НП типа I в нашем исследовании), и количество жителей, чей молочный рацион состоит только из магазинных продуктов (45% респондентов). Но при этом доли потребления коровьего и козьего молока исключительно из ЛПХ различаются в 2 раза: менее 15% – для жителей Беларуси и почти 30% – для жителей Брянской области. Возможные причины такого расхождения будут рассмотрены далее, при сопоставлении данных нашего исследования с данными официальной статистики 2 стран.

Подобные результаты исследования структуры рационов питания жителей сельских и городских НП в отношении потребления молока были получены и в первые годы после аварии на ЧАЭС. По результатам работы [3], через год после аварии оцененная доля населения городских НП, употребляющего молоко из ЛПХ, составляла 15–20% (по нашему исследованию – 23%), при этом доля сельского населения, не употребляющего в пищу молоко, составляла 12% (по результатам нашего исследования – 16%), городского – 16% (по результатам нашего исследования – 15%).

Объемы годового потребления населением местных пищевых продуктов

Объемы потребления пищевых продуктов оценивались для разных возрастных категорий жителей с выделением основных групп местных сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов. Результаты оценки средних значений объемов потребления основных видов пищевых продуктов местного происхождения для жителей 2 типов НП представлены в таблице 2.

Общая численность жителей НП типа I, для которых оценены объемы потребления, составила 2717 человек, в том числе 2261 взрослых жителей, 84 подростка, 260 школьников, 85 дошкольников с питанием в детских учреждениях, 27 дошкольников, находящихся только на домашнем питании; общая численность жителей НП типа II составила 253 человека, в том числе 196 взрослых жителей, 8 подростков, 36 школьников, 12 организованных дошкольников. В данном исследовании не представилось возможным оценить объемы потребления для детей НП типа II дошкольного возраста, не посещающих детские дошкольные учреждения, – сведения о рационе питания были получены только для 1 такого ребенка.

Совокупный объем годового потребления взрослыми жителями НП типа I молочных продуктов, произведенных ЛПХ, в среднем составил примерно 50 кг (с учетом потребления творога в пересчете на молоко), мяса сельскохозяйственных животных – 35 кг, из которых потребление свинины составляет 22 кг, говядины – чуть больше 1 кг, домашней птицы – 10 кг, мяса прочих сельскохозяйственных животных (баранины, крольчатины, козлятины) – около 2 кг. Графическое представление соотношения долей потребления основных сельскохозяйственных пищевых продуктов животного происхождения жителями разных возрастных категорий НП типа I приведено на рисунке 1 (фрагмент а), на котором, помимо перечисленных здесь продуктов, также представлено потребление куриных яиц (в пересчете количества на вес).

Таблица 2

Средние объемы потребления жителями обследованных населенных пунктов основных видов местных пищевых продуктов, кг/год

[Table 2]

Average consumption volumes of local main foodstuffs by inhabitants of surveyed settlements, kg/year

Пищевые продукты [Foodstuffs]	Взрослые [adults]	Подрост.* [teenag.*]	Школьн.* [schoolch.*]	Дошк. орг.* [presch. org.*]	Дошк. неорг.* [presch. unorg.*]
<i>НП типа I [Settlements "Type I"]</i>					
Молоко коровье [cow milk]	35	40	30	15	15
Картофель [potatoes]	110	90	75	35	20
Грибы лесные [mushrooms]	8,5	6	2,6	0,6	1
<i>НП типа II [Settlements "Type II"]</i>					
Молоко коровье [cow milk]	10	14	12	4	н/д [n.d.] **
Картофель [potatoes]	75	75	60	30	н/д [n.d.]
Грибы лесные [mushrooms]	7	8	4,2	0,6	н/д [n.d.]

* «Подрост.» – подростки, «Школьн.» – школьники, «Дошк. орг.» – дошкольники организованные, «Дошк. неорг.» – дошкольники не-организованные [* «teenag» – teenagers, «schoolch.» – schoolchildren, «presch. org.» – organized preschoolers, «presch. unorg.» – unorganized preschoolers].

** н/д– нет данных [n.d. – no data].

Взрослые жители НП типа II в среднем почти в 3 раза меньше, чем жители НП типа I, употребляют в пищу местные молочные продукты (только 13 кг/год с учетом потребления творога) и в меньших объемах потребляют мясные продукты, произведенные в ЛПХ, – только 25 кг/год, из которых потребление свинины также составляет 60%, около 30% – потребление мяса домашней птицы и менее

10% – потребление говядины (2 кг/год) и мяса прочих сельскохозяйственных животных. Структура потребления городскими жителями местных продуктов животного происхождения также продемонстрирована на рисунке 1 (фрагмент b).

Потребление овощей жителями практически всех возрастных категорий, за исключением детей дошкольного

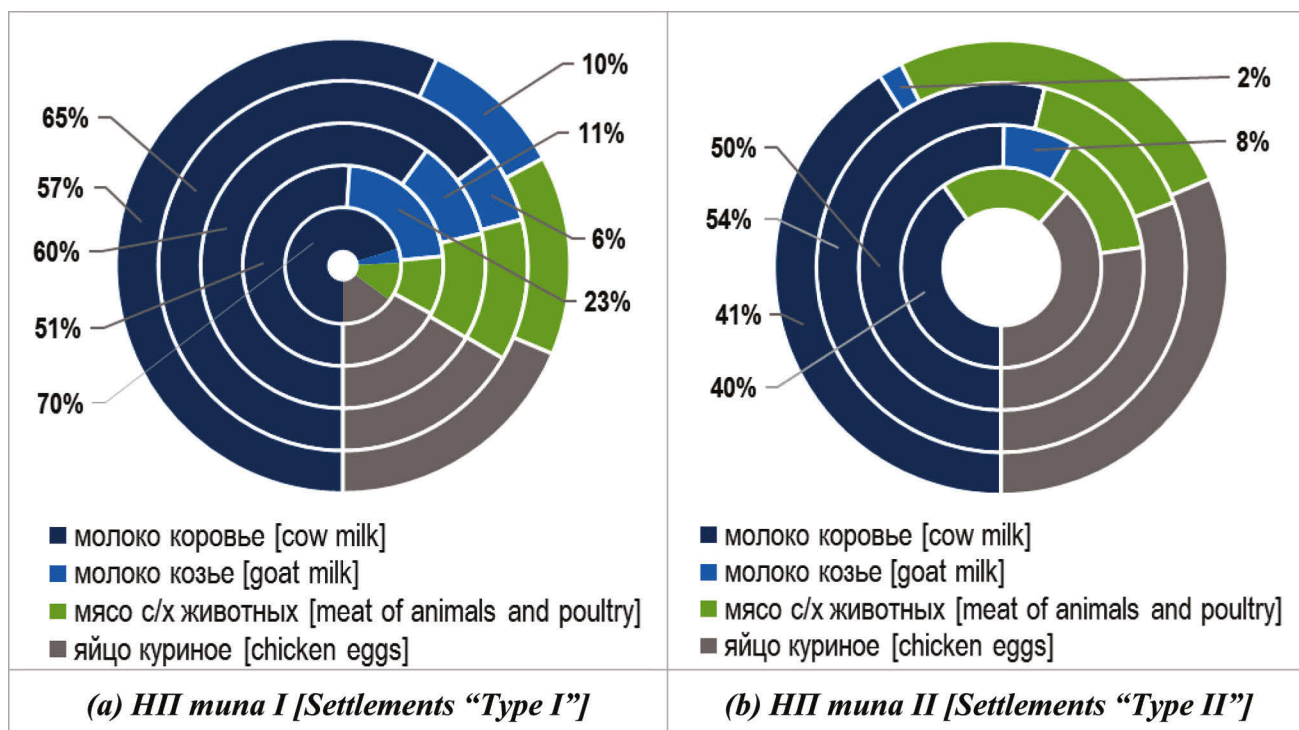


Рис. 1. Структура потребления сельскохозяйственных пищевых продуктов жителями обследованных населенных пунктов. Секторы диаграммы (от внешнего к внутреннему): взрослые, подростки, школьники, дошкольники организованные, дошкольники неорганизованные

[Fig. 1. Consumption of local agricultural foodstuffs by inhabitants of surveyed settlements. Sectors of the diagram (from the outer sector to the inner one): adults, teenagers, schoolchildren, organized preschoolers, unorganized preschoolers]

возраста, ниже потребления картофеля на 20–30%; дошкольники овощи и картофель потребляют почти в равных объемах. Столовую зелень жители НП типа I включают в свой рацион чаще (2 кг/год), чем жители НП типа II.

Сопоставление объемов потребления сельскохозяйственных пищевых продуктов взрослыми жителями 2 типов НП позволяет подтвердить выводы более ранних исследований, закрепленные в методических документах^{8,9}, о том, что городские жители в меньших объемах употребляют практически все виды продуктов, произведенных в ЛПХ. Молоко коровье (включая кисломолочные напитки) жители сельских территорий (НП типа I) потребляют почти в 4 раза больше, чем жители городов (НП типа II), свинину и мясо домашней птицы – в 1,5 раза, мясо прочего домашнего скота – почти в 3 раза. Говядину сельские и городские жители едят в небольших количествах (в среднем 1–2 кг/год), поэтому потребление говядины можно считать сопоставимым. Распределение долей потребления продуктов в группе «Мясо домашней птицы» и «Овощи» между жителями НП 2 типов также сходно (рис. 2). Наблюдаются различия в потреблении козьего молока: средние объемы потребления этого продукта за год взрослыми жителями НП типа I почти в 15 раз превышают объемы потребления взрослыми жителями НП

типа II (0,4 кг/год). Овощную продукцию (как картофель, так и прочие овощи, столовую зелень) из ЛПХ жители сельской местности едят в среднем в 1,5 раза больше, чем горожане. Различия в потреблении всех перечисленных групп пищевых продуктов жителями НП 2 типов статистически значимы ($p < 0,05$), что продемонстрировано на рисунке 3 для такой категории продуктов, как молоко коровье (рис. 3, фрагмент а).

Оцененные объемы потребления взрослыми жителями коровьего молока по разным НП типа I варьируют в широком диапазоне: в некоторых НП (в 30 НП из 160 НП) не было жителей, употребляющих местное коровье молоко ввиду отсутствия в НП хозяйств с коровами, в других же средний годовой объем оценен почти в 200 кг. Медианное значение распределения величин годового объема потребления данного пищевого продукта взрослыми жителями оценено как нулевое, верхний квартиль – 48 кг. Средние объемы потребления молока подростками выше, чем взрослыми жителями. Однако и разброс исследуемых величин больше: стандартное отклонение от среднего значения оценено как 86 кг (для взрослых жителей – 71 кг). Распределение величин годового объема потребления молока подростками характеризуется следующими значениями статистических параметров:

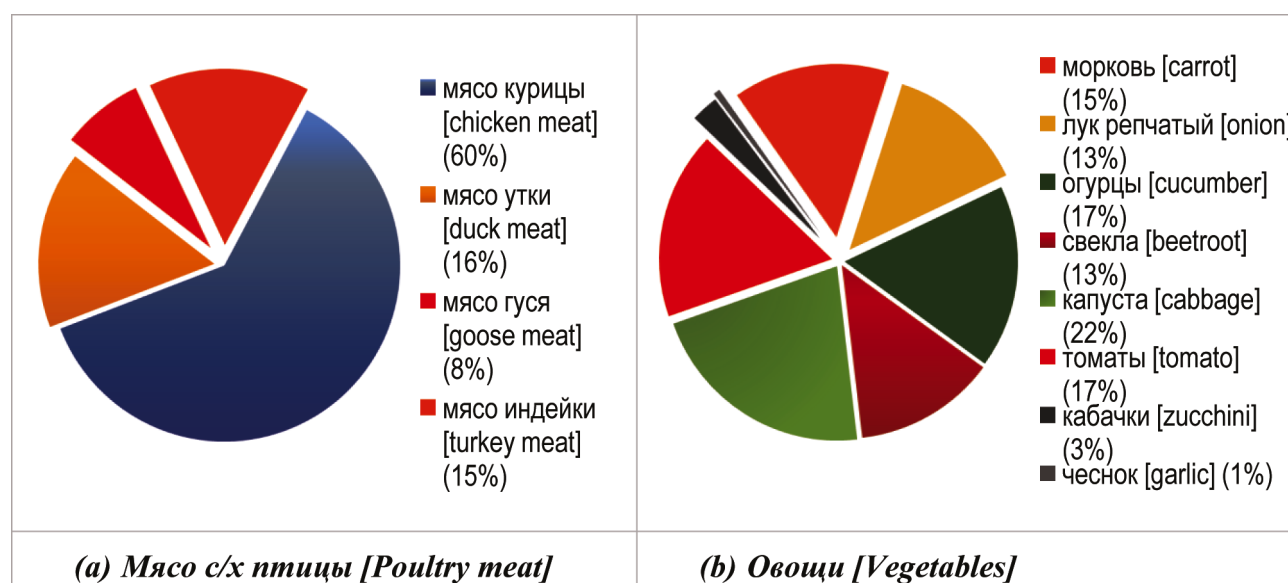


Рис. 2. Структура потребления мяса домашней птицы и овощей взрослыми жителями НП типа I
[Fig. 2. Consumption of local poultry meat and vegetables by adults of settlements "Type I"]

⁸ Методические указания МУ 2.6.1.2003-05 «Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». М., 2005. 16 с. [Methodological guidelines. The assessment of critical population groups average annual effective exposure doses in radioactively contaminated Russian Federation settlements after Chernobyl NPP accident (MG 2.6.1.2003-05), Moscow, 2005, 16 p. (In Russ.)]

⁹ Методические указания МУ 2.6.1.3152-13 «Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». Изм. 1 к МУ 2.6.1.2003-05. М., 2014. 7 с. [Methodological guidelines. The assessment of critical population groups average annual effective exposure doses in radioactively contaminated Russian Federation settlements after Chernobyl NPP accident (2.6.1.3152-13). Changes to methodological guidelines 2.6.1.2003-05, Moscow, 2014, 7 p. (In Russ.)]

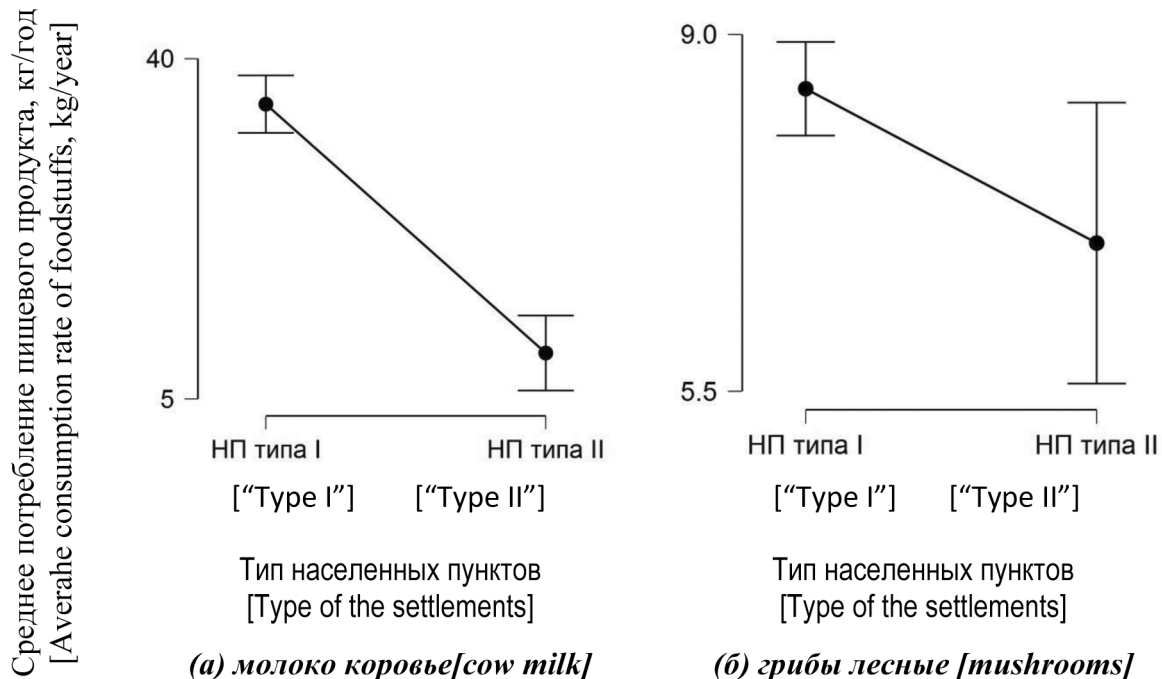


Рис. 3. Доверительные интервалы ($P=0,95$) средних значений годового потребления молока коровьего (а) и грибов (б) взрослыми жителями НП типа I и НП типа II

[Fig. 3. Confidence intervals for the mean values ($P=0.95$) of consumption rates of cow milk (a) and mushrooms (b) by adult inhabitants of settlements “Type I” (the (mostly) rural ones) and “Type II” (the urban ones)]

медианное значение – также нулевое, верхний квартиль – 31 кг. Такие характеристики распределений величин, продемонстрированные здесь на примере взрослых жителей и подростков, объяснимы, поскольку не более 40% жителей НП типа I употребляют в пищу молоко из ЛПХ, о чем упомянуто выше. Тем не менее, анализ индивидуальных значений объемов потребления сельскохозяйственных продуктов показал, что среди пищевых продуктов животного происхождения наибольшие значения годового потребления относятся именно к потреблению молока (95% квантиль (далее – K95): в распределении величин потребления молока взрослыми жителями НП типа I определен как 165 кг), а среди продуктов растительного происхождения – к картофелю (K95=210 кг).

В отношении потребления населением пищевых продуктов природного происхождения получены следующие результаты: объем годового потребления взрослыми жителями НП типа I лесных ягод в среднем составил 2,4 кг, мяса дичи – 0,9 кг, рыбы местных водоемов – 4,2 кг, а взрослыми жителями НП типа II – 1,8 кг, 1,1 кг и 4,6 кг соответственно. Детское население (школьники) мясо дичи и рыбу местных водоемов потребляет в меньших объемах, чем взрослые жители, а лесные ягоды – в больших. Объемы потребления лесных грибов населением обоих типов НП представлены в таблице 2. Ввиду малого числа участников исследования возрастных категорий младше 18 лет НП типа II сделать какие-либо выводы о рационах их питания в данном исследовании не представляется возможным.

Сопоставление объемов потребления взрослыми жителями 2 типов НП пищевых продуктов природного происхождения (см. табл. 2, рис. 3 (б) и рис. 4 (б)) демон-

стрирует расхождение средних значений не более чем на 35% (по всем категориям продуктов), причем различия статистически не значимы, за исключением группы «Мясо дичи» ($p < 0,05$). Среди природных пищевых продуктов наибольшие значения годового потребления характерны для лесных грибов (K95 = 30 кг). Для сравнения – оцененное значение K95 в распределении величин потребления лесных ягод равно 10 кг. Средние объемы годового потребления взрослыми жителями лесных грибов для разных НП типа I варьируют от низких значений (менее 1 кг) до 30 кг.

В результате проведенного исследования дополнительно определены объемы среднегодового потребления взрослыми жителями НП типа I некоторых не самых критичных с точки зрения дозообразования природных пищевых продуктов. Так, среднее годовое потребление меда с местных пасек жителями сельских НП составило 0,9 кг, дикорастущего щавеля – 0,5 кг, пряных и лекарственных трав – 0,12 кг (сух. вес), сока березового – 10 л.

Как упоминалось выше, большая часть НП, для которых были проведены исследования структуры рационов питания жителей, относится к НП типа I. Ввиду довольно широкого диапазона численности населения в этой категории в нашем исследовании была проведена стратификация этой группы НП с целью выявления возможных различий в потреблении основных видов местных пищевых продуктов: малые НП, где численность жителей не превышает 100 человек (далее – НП типа I¹⁰⁰); НП с численностью жителей от 100 до 1000 человек (далее – НП типа I¹⁰⁰⁰); НП с численностью жителей от 1000 до 10 000 человек (далее – НП типа I¹⁰⁰⁰⁰). Статистически значимые различия ($p < 0,01$) выявлены в объемах потребления взрослым на-

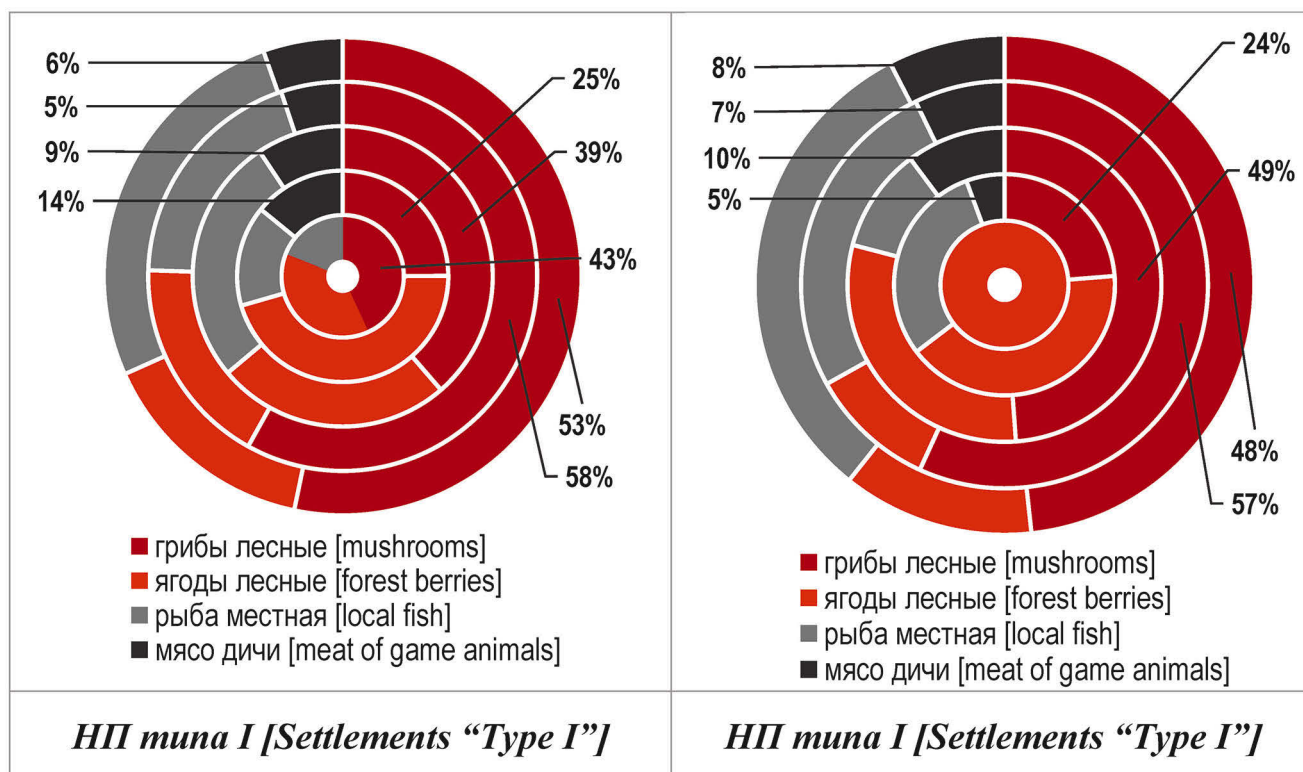


Рис. 4. Структура потребления пищевых продуктов природного происхождения жителями обследованных населенных пунктов. Секторы диаграммы (от внешнего к внутреннему): взрослые, подростки, школьники, дошкольники организованные, дошкольники неорганизованные

[Fig. 4. Consumption of local wild origin foodstuffs by inhabitants of settlements: Sectors of the diagram (from the outer sector to the inner one): adults, teenagers, schoolchildren, organized preschoolers, unorganized preschoolers]

селением НП типа I¹⁰⁰ (313 чел.) молока коровьего и говядины в сравнении с подгруппой НП типа I¹⁰⁰⁰ (1574 чел.). Из природных продуктов статистически значимые различия ($p < 0,01$) установлены в объемах потребления взрослыми жителями НП типа I¹⁰⁰ рыбы местных водоемов и мяса диких животных в сравнении с подгруппой НП типа I¹⁰⁰⁰⁰ (332 чел.). Различий в объемах потребления молока козьего, картофеля, лесных грибов и ягод не выявлено. Однако стоит отметить, что взрослые жители НП типа I¹⁰⁰ в среднем за год в больших объемах (в сравнении с жителями НП типа I¹⁰⁰⁰⁰ и НП типа I¹⁰⁰⁰⁰⁰) употребляют в пищу молоко козье (8,6 кг) и говядину (2 кг).

Стратификация НП на подгруппы позволила также сравнить объемы потребления местных пищевых продуктов детьми младшего возраста, проживающими в близлежащих по численности жителей НП. В нашем исследовании наибольший объем данных для детей дошкольного возраста (77 чел.) получен по результатам опросов жителей НП типа I¹⁰⁰⁰. Сопоставление средних значений объемов потребления местных продуктов детьми, посещающими дошкольные учреждения (дошкольники организованные, т.е. дошкольники с организованным питанием в детских учреждениях, 57 чел.), и детьми, чей рацион питания составляют только домашние продукты (дошкольники неорганизованные, 20 чел.), показало, что дошкольники неорганизованные в больших объемах потребляют молоко (в 1,3 раза), лесные грибы (почти в 2 раза), рыбу местных водоемов (в 1,5 раза) и чаще употребляют пряные дикорастущие травы. Однако анализ характеристик распре-

делений исследуемых величин показал, что выявленные различия статистически не значимы.

Можно сопоставить данные об объемах потребления основных сельскохозяйственных пищевых продуктов жителями НП типа I (сельскими жителями), полученные в данном исследовании, с данными официальной статистики Российской Федерации и Республики Беларусь. По данным нашего исследования, средний годовой совокупный (из всех источников поступления) объем потребления молока и молочных продуктов населением оценивается как 240 кг (в том числе 87 кг приходится только на молоко цельное и кисломолочные напитки). Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (далее – Росстат) [8], потребление молочных продуктов сельскими жителями страны (в целом) в 2020 г. оценивается как 260 кг (в том числе 66 кг – цельное молоко и кисломолочные напитки), а по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь (далее – НСК РБ) [9] – 247 кг. Годовой объем потребления мяса сельскохозяйственных животных по данным нашего исследования оценивается в 51 кг (в том числе потребление свинины – 25 кг), по данным Росстата по потреблению основных видов мяса – 57 кг (в том числе свинины – 17 кг). При этом значение показателя совокупного потребления мяса и мясных продуктов сельскими жителями по России определено как 86 кг (97 кг для Брянской области), по Беларуси – как 78 кг. Годовое потребление картофеля и овощей по результатам нашего опроса жителей приграничных территорий Брянской области оценено как 103 и

93 кг соответственно. Показатели по потреблению сельским населением России пищевых продуктов этих категорий, по данным Росстата, имеют значения 68 кг и 108 кг, по данным НСК РБ – 76 кг и 93 кг. Средний объем потребления рыбы (местных водоемов и приобретаемой в торговой сети), по данным нашего исследования, составляет 12 кг/год. Общероссийский показатель годового потребления рыбопродуктов, без учета рыбных консервов и рыбных полуфабрикатов, – 19 кг. По Беларуси годовое потребление рыбопродуктов в среднем составляет 15 кг.

Приведенные сведения позволяют сделать вывод о том, что оцененные в нашем исследовании объемы потребления основных пищевых продуктов жителями сельских приграничных территорий Брянской области сопоставимы с данными органов статистической информации России и Беларуси, причем наши оценки в большей степени согласуются с данными по сельским жителям Республики Беларусь, представленными НСК РБ. Расхождение наблюдается в оценках годового потребления картофеля – по данным нашего исследования, жители приграничных территорий Брянской области употребляют данный продукт в пищу в объемах, примерно на 30% больших, чем жители Беларуси. Однако по данным Росстата по Брянской области за 2020 г. [10], годовой объем потребления населением области картофеля составляет 150 кг, что ближе к оценкам, полученным в нашем исследовании. Также по данным Росстата [10], в России доля производства молока в хозяйствах населения составляет 34% от общего объема его производства, что косвенным образом согласуется с нашей оценкой доли потребления сельскими жителями молока «только из ЛПХ» в общем объеме потребления данного сельскохозяйственного продукта (34% для жителей НП типа I).

Согласно данным исследований по оценке вклада лесных пищевых продуктов в дозу внутреннего облучения населения [4, 11, 12], уровни годового потребления жителями сельских НП чернобыльских территорий Беларуси лесных грибов варьируют от 2 до 20 кг, ягод – от 1 до 4 кг. В обзорной работе [13] авторы приводят обобщенные величины годового потребления грибов, использованные для целей дозовых оценок в разных исследованиях, в диапазоне от 5 до 10 кг. Таким образом, оцененные нами годовые объемы потребления лесных грибов и ягод взрослыми жителями приграничных территорий сопоставимы с соответствующими данными других исследований [4, 11–13].

Сопоставление результатов данного исследования с результатами наших ранее проведенных работ по изучению рационов питания жителей сельских НП чернобыльских территорий в начале – середине 2010-х гг. [4] показывает снижение среднегодовых объемов потребления жителями молочных продуктов, произведенных в ЛПХ, и потребления говядины. Наши современные оценки по потреблению жителями обследованных НП коровьего молока ниже в 2,5 раза, а говядины – в 8 раз в сравнении с ранее полученными оценками. Данный факт может быть связан с сокращением поголовья молочного скота в сельской местности и с удорожанием содержания КРС мясных пород, а также с прочими экономическими причинами [14, 15]. По остальным позициям структуры рациона питания сельских жителей результаты данного и прошлых исследований сопоставимы.

Виды пищевых продуктов местного происхождения, представительные в контексте формирования дозы внутреннего облучения населения

Исследование структуры потребления жителями пищевых продуктов местного производства (происхождения) проводилось также и с целью выделения основных их видов, наиболее употребляемых в пищу на современном этапе радиационной аварии и имеющих значение с точки зрения формирования дозы облучения населения. Результаты изучения потенциальных путей формирования дозы внутреннего облучения жителей обследованных НП, изложенные в публикации [1], позволили прийти к выводу, что в настоящее время на уровне радиационного воздействия на население наибольшее влияние имеет потребление им пищевых продуктов, производство (или происхождение) которых связано с использованием природных ресурсов радиоактивно загрязненных территорий. Результаты современных исследований других специалистов [18, 19], а также опыт изучения рационов питания прошлых лет [4, 20] показывают, что среди сельскохозяйственных пищевых продуктов таким продуктом является молоко (коровье или козье), среди природных пищевых продуктов – грибы, что хорошо согласуется с результатами нашего исследования. Объемы потребления населением козьего молока в сравнении с молоком коровьим значительно ниже, поэтому данный вид пищевого продукта считать представительным с точки зрения дозообразования нецелесообразно. Современные исследования уровней содержания радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах растительного происхождения территорий чернобыльского следа [21–25] позволяют сделать вывод о том, что, несмотря на значительный объем их потребления, на современном этапе аварии данный тип пищевых продуктов считать представительным также не следует.

Заключение

В данной публикации приводятся результаты исследования структуры рационов питания жителей приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, проведенного в рамках радиационно-гигиенических обследований 2019–2022 гг. Дана общая характеристика рационов питания жителей разных возрастных групп, оценены годовые объемы потребления жителями разного возраста пищевых продуктов местного происхождения. Выделены основные виды пищевых продуктов сельскохозяйственного производства и природного происхождения, наиболее активно потребляемые населением на современном этапе радиационной аварии и значимыми в контексте формирования дозы внутреннего облучения населения.

Установлено, что молочные продукты из ЛПХ в НП типа I (сельские НП) употребляет 42% населения, а НП типа II (городские НП) – 23%. Овощная продукция присутствует в рационе практически всех опрошенных жителей. Из продукции животноводства, произведенной в ЛПХ, наиболее употребляемой является свинина, мясо курицы и куриные яйца. Свинину потребляют 80% сельских жителей и 58% городских, куриное мясо – 55% и 32%, куриные яйца – 90% и 65% соответственно.

Лесные грибы употребляют в пищу 70% жителей (как НП типа I, так и НП типа II), лесные ягоды – 60%. Мясо диких животных употребляют в пищу 8% жителей сельских территорий, тогда как из ответов городских респондентов следует, что дичь в пищу употребляет 15% населения. Рыба местных водоемов присутствует в рационах питания 50% жителей как НП типа I, так и НП типа II.

Совокупный объем годового потребления взрослыми жителями НП типа I молочных продуктов, произведенных в ЛПХ, в среднем составил примерно 50 кг, из них 35 кг – молоко коровье, 6,4 кг – молоко козье, 8,6 кг – остальные продукты (творог, сметана и пр.). Совокупный объем годового потребления мяса сельскохозяйственных животных и птицы составляет 35 кг, из них около 23 кг приходится на свинину (две трети от общего объема потребления), чуть больше 1 кг – на говядину, 10 кг – на мясо домашней птицы и около 1 кг – на мясо прочих сельскохозяйственных животных. Взрослые жители НП типа II в среднем почти в 3 раза меньше, чем жители НП типа I, употребляют в пищу местные молочные продукты – только 13 кг/год с учетом потребления творога. Также в меньших объемах они употребляют в пищу мясные продукты, произведенные в ЛПХ, – только 25 кг/год, из которых около 17 кг (также две трети) приходится на свинину, около 7,5 кг (или 30%) – на мясо домашней птицы, 0,8 кг (или 3%) – на говядину и мясо прочих сельскохозяйственных животных. Жители НП типа I в среднем в год употребляют примерно 9 кг лесных грибов, жители НП типа II – 7 кг. В отношении потребления взрослым населением прочих пищевых продуктов природного происхождения в исследовании получены следующие оценки: объем годового потребления взрослыми жителями НП сельских территорий лесных ягод в среднем составил 2,4 кг, мяса диких животных – 0,9 кг, рыбы местных водоемов – 4,2 кг, а взрослыми жителями городских НП – 1,8 кг, 1,1 кг и 4,6 кг соответственно. Детское население все категории пищевых продуктов, за исключением лесных ягод, потребляет в меньших объемах. Лесные ягоды дети употребляют примерно на 10% больше, чем взрослые жители.

Сопоставление результатов оценки объемов потребления пищевых продуктов взрослыми жителями НП типа I с современными результатами изучения рационов питания сельского населения России и Беларуси, представленными в научной литературе и в статистических изданиях, позволило сделать вывод об их удовлетворительной сходимости.

Более подробное изучение структуры рационов питания взрослых жителей сельских территорий позволило выделить НП с численностью населения менее 100 человек в отдельную категорию. Взрослые жители данных НП в среднем за год в меньших объемах употребляют в пищу коровье молоко (около 30 кг), но в больших объемах – молоко козье (примерно 9 кг) и говядину (около 2 кг).

Как следует из представленных результатов исследования современной структуры потребления жителями местных пищевых продуктов, в сравнении с прошлым периодом времени десятилетней давности [4], сократилось потребление молочных продуктов и говядины, произведенных в ЛПХ, но потребление пищевых продуктов природного происхождения осталось на прежнем уровне.

Сведения о личном вкладе авторов

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

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

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

Брук Г.Я. – разработка концепции, определение цели и формулирование задач исследования, дизайн проекта, координация работы участников проекта, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов исследования.

Варфоломеева К.В. – анкетирование населения, обработка и систематизация первичных материалов исследования, редактирование текста статьи.

Дроздова Е.А. – анкетирование населения, обработка и систематизация первичных материалов исследования.

Жеско Т.В. – анкетирование населения, обработка и систематизация первичных материалов исследования.

Кадука М.В. – дизайн опросных карт для населения, анкетирование населения, обработка и систематизация первичных материалов исследования, поиск литературных данных, содержательное редактирование текста статьи.

Кормановская Т.А. – анкетирование населения, обработка и систематизация первичных материалов исследования.

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

Кудряшов А.В. – организация работ по проекту на территории административных районов Брянской области, координация работы с представителями администраций населенных пунктов.

Ладик А.А. – организация работ по проекту на территории административных районов Брянской области, координация работы с представителями администраций населенных пунктов, сбор первичных материалов исследования.

Лалаян В.А. – организация работ по проекту на территории административных районов Брянской области, координация работы с представителями администраций населенных пунктов, сбор первичных материалов исследования.

Благодарности

Авторы выражают благодарность и признательность за содействие в работе Н.В. Титову, А.В. Громову, К.А. Сапрыкину (сотрудники Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева) и О.С. Баженовой (являлась специалистом того же института в период проведения исследований), а также рецензентам за конструктивные замечания и рекомендации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. Романович И.К., Базюкин А.Б., Барковский А.Н. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 1: Характеристика населенных пунктов. // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 23–36. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-22-36.
2. International Commission on Radiological Protection. Radiological protection of people and the environment in the event of a large nuclear accident: update of ICRP Publications 109 and 111. ICRP Publication 146. // Annals of the ICRP. 2020; Vol. 49, No. 4.
3. Травникова И.Г., Балонов И.И., Каплун И.С. Рационы питания жителей западных районов Брянской области и их изменения, связанные с аварией на ЧАЭС // Проблемы смягчения последствий Чернобыльской катастрофы: материалы международного семинара. Часть I. Брянск: Знание, 1993. С. 132–134.
4. Братилова А.А., Брук Г.Я. Влияние потребления различных пищевых продуктов на формирование доз внутреннего облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 53–59.
5. Решетникова Н.В. Личное подсобное хозяйство в структуре агропродовольственного комплекса России: исторические предпосылки и современное состояние // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. Т. 65, № 2 (386). С. 120–123. DOI: 10.55186/25876740_2022_65_2_120.
6. Серова Е., Карлова Н. Российская Федерация: Рынок молока и молочных продуктов. Rome: FAO, 2010.
7. Никалаенка Е.В. Обоснование подходов оценки модели репрезентативного лица для радиационной защиты населения вокруг Белорусской АЭС // Здоровье и окружающая среда: сборник научных трудов. Минск: РНМБ, 2017. С. 40–44.
8. Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах в 2020 году (по итогам Выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств). Москва: Федеральная служба государственной статистики, 2021.
9. Социальное положение и уровень жизни населения Республики Беларусь. Статистический сборник / Под общ. ред. Медведова И.В. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2021. 250 с.
10. Потребление основных продуктов питания населением Российской Федерации. Москва: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2021.
11. Азовская Н.О., Перетрухин В.В., Чернушевич Г.А. Исследование степени радиоактивного загрязнения пищевой продукции леса и ее вклад в дозовую нагрузку населения // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 1. 2018. Т. 2. С. 251–258.
12. Чернушевич Г.А., Азовская Н.О., Домненкова А.В., Киселев С.В. Анализ влияния радиоактивного загрязнения «даров леса» на внутреннее облучение населения // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 1. 2021. Т. 2 (246). С. 298–305.
13. Панов А.В., Марочкина Е.В., Пономаренко В.В. О роли грибов в формировании доз внутреннего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС территориях // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 63–70.
14. Россияне потребляют все меньше молочной продукции [Электронный ресурс]. URL: https://milknews.ru/analitika-rinka-moloka/rinok-moloka-v-Rossii/Rossijane_potreblyajut_vse_menshe_molochnoj_produkcii.html (Дата обращения: 30.04.2023).
15. Мартищенкова Е.В. Уровень осведомленности сельского населения о правилах потребления продукции рек и водоемов в регионах, пострадавших от аварии на ЧАЭС // Современные проблемы радиационной медицины: от науки к практике. Гомель: ГУ РНПЦ РМиЭЧ, 2020. С. 38–39.
16. Подвальская В.С. Уровень информированности населения о способах снижения радионуклидов в дикорастущих растениях, ягодах и грибах (по результатам социологического опроса сельского населения районов, пострадавших от аварии на ЧАЭС) // Современные проблемы радиационной медицины: от науки к практике. Гомель: ГУ РНПЦ РМиЭЧ, 2020. С. 44–45.
17. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / Под общ. ред. академика РАН Г.Г. Онищенко, профессор А.Ю. Поповой. СПб: НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, 2016. Т. 1. 448 с.
18. Цыгвинцев П.Н., Цуранков Э.Н. Влияние информированности сельского населения на формирование доз внутреннего облучения / Радиоэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 383–387.
19. Агеева Т.Н., Мерзлова О.А. О дозах облучения населения могилевской области в зонах радиоактивного загрязнения / Радиоэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 166–168.
20. Jacoba 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.
21. Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области: Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2018 г. Брянск: Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области, 2019. 266 с.
22. Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области: Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2019 г. Брянск: Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области, 2020. 276 с.
23. Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области: Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2020 г. Брянск: Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области, 2021. 253 с.
24. Нилова Е.К. Бортновский В.Н., Тагай С.А. и др. Оценка современных уровней ^{241}Am и ^{137}Cs в почве, продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси) // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 25–37.
25. Нилова Е.К. Бортновский В.Н., Тагай С.А. и др. ^{241}Am и ^{137}Cs на территории Хойникского района Беларуси: оценка радиоэкологической обстановки на современном этапе ситуации существующего облучения // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 17–30.

Поступила: 26.10.2023 г.

Романович Иван Константинович – доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, директор Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

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

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

Варфоломеева Ксения Владимировна – 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

Дроздова Елена Анатольевна – ведущий инженер-исследователь лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

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

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

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

Кудряшов Александр Валентинович – главный врач филиала Центра гигиены и эпидемиологии в городе Клинцы Брянской области Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Клинцы, Брянская область, Россия

Ладик Андрей Александрович – эксперт-физик по контролю за источниками ионизирующих и неионизирующих излучений филиала Центра гигиены и эпидемиологии в городе Клинцы Брянской области Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Клинцы, Брянская область, Россия

Лалаян Вартан Альбертович – заместитель главного врача по санитарно-эпидемиологическим вопросам филиала Центра гигиены и эпидемиологии в городе Клинцы Брянской области Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Клинцы, Брянская область, Россия

Для цитирования: Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я., Варфоломеева К.В., Дроздова Е.А., Жеско Т.В., Кадука М.В., Кормановская Т.А., Кравцова О.С., Кудряшов А.В., Ладик А.А., Лалаян В.А. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 2: Структура рационов питания населения // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 7-21. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-7-21

Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 2: Population's food preferences (diet)

Ivan K. Romanovich¹, Anatoly B. Bazyukin¹, Anzhelika A. Bratilova¹, Gennadiy Ya. Bruk¹, Kseniya V. Varfolomeeva¹, Elena A. Drozdova¹, Tatyana V. Zhesko¹, Marina V. Kaduka¹, Tatyana A. Kormanovskaya¹, Olga S. Kravtsova¹, Aleksandr V. Kudryashov², Andrey A. Ladik², Vartan A. Lalayan²

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

²Center of Hygiene and Epidemiology in Klintsy city, Bryansk region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Klintsy, the Bryansk region, Russia

This study presents results of radiation-hygienic surveys of the Bryansk Oblast settlements bordering the Republic of Belarus. The data were obtained in the course of implementation of measures of the "Program of joint activities of Russia and Belarus within the framework of the Union State for the protection of the population and rehabilitation of the territories affected by the Chernobyl NPP accident" in 2019–2022. The second part of the study presents structure of population's food preferences (diet). A general description of the diets of residents is given and the main types of local food products at the present stage of the radiation accident are identified. The current levels of consumption of locally produced food (and products of local origin) by residents of different age categories have been assessed. The obtained results of assessing the levels of food consumption have been compared with our own results of earlier studies and with the results of studies on the population of Russia and Belarus. Similarly with previous years, among agricultural food products the most consumed products are milk and potatoes and among natural food products are mushrooms. The established levels of consumption of local dairy products and beef have decreased over the past ten years and the resident consumptions of mushrooms and potatoes are in the same levels as before.

Key words: Chernobyl NPP accident, cesium-137, population, internal exposure, food preferences (diet).

Information about personal contribution of the authors

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

Bazyukin A.B. – search and analysis of literary data sources, collection and systematization of research materials, substantive editing of the text of the article.

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

Bruk G.Ya. – concept development, definition of the goal and formulation of the research objectives, project design, coordination of the work of the project participants, carrying out calculations, analysis and interpretation of the research results.

Varfolomeeva K.V. – surveying the population, processing and systematization of primary research materials, editing the text of the article.

Drozdova E.A. – population survey, processing and systematization of primary research materials.

Zhesko T.V. – population survey, processing and systematization of primary research materials.

Kaduka M.V. – design of questionnaire cards for the population, surveying the population, processing and

systematization of primary research materials, literature search, substantive editing of the text of the article.

Kormanovskaya T.A. – surveying the population, processing and systematization of primary research materials.

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

Kudryashov A.V. – organization of the project activities in the administrative districts of Bryansk Oblast, coordination of work with the representatives of the administrations of the settlements.

Ladik A.A. – organization of project activities in the administrative districts of Bryansk Oblast, coordination of work with representatives of local administrations, collection and systematization of primary research materials.

Lalayan V.A. – organization of project activities in the administrative districts of Bryansk Oblast, coordination of work with representatives of localities administrations, collection and systematization of primary research materials.

Acknowledgements

The authors express their gratitude and appreciation for assistance in the work to N.V. Titov, A.V. Gromov, K.A. Saprykin (employees of the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. P.V. Ramzaev during the period of

Anzhelika A. Bratilova

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

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

the study) and O.S. Bazhenova (who was employee of the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. P.V. Ramzaev during the period of the study), as well as to the reviewers for constructive comments and recommendations.

Information on conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Information about the source of funding

The study was performed within the framework of the work under the state contract No. 0173100001419000019 dated 18.10.2019 with the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing.

References

- Romanovich IK, Bazyukin AB, Barkovsky AN, Biblin AM, Bratilova AA, Bruk GYa et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 1: Characteristics of the settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 23–36. (In Russian).
- International Commission on Radiological Protection. Radiological protection of people and the environment in the event of a large nuclear accident: update of ICRP Publications 109 and 111. ICRP Publication 146. *Annals of the ICRP*. 2020;49(4).
- Travnikova IG, Balonov MI, Kaplun IS. Diet of residents of Bryansk region western areas and its variation resulted from the Chernobyl accident. In: Problems of mitigating the consequences of the Chernobyl disaster: materials of an international seminar. Part I. Bryansk: Znanie; 1993. P.132–4. (In Russian).
- Bratilova AA, Bruk GYa. Influence of the consumption of different foodstuffs on the internal exposure dose formation in the adult population of the Russian federation after the accident at the Chernobyl NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 53–59. (In Russian).
- Reshetnikova NV. Personal planning in the structure of the agro-food complex of Russia: historical background to formation and the present state. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal = International Agricultural Journal*. 2022; 65(2(386)): 120–123. (In Russian).
- Serova E, Karlova N. Russian Federation: Market of milk and dairy products. Rome: FAO; 2010. (In Russian).
- Nikalaenka EV. Justification of approaches for assessing a representative person model for radiation protection of the population around the Belarusian NPP, In: Health and Environment: Collection of Scientific Works. Minsk: RSML; 2017. P. 40–44. (In Russian).
- Household food consumption in 2020 (results of Household Budget Sample Survey). Moscow: Federal State Statistics Service; 2021. (In Russian).
- Medvedev IV (ed.). Social status and standard of living of population in the Republic of Belarus. Statistical survey. Minsk: National Statistical Committee of the Republic of Belarus; 2021. 250 p. (In Russian).
- Consumption of basic food products by the population of the Russian Federation. Moscow: Federal State Statistics Service (Rosstat); 2021. (In Russian).
- Azovskaya NO, Peretrukhin VV, Chernushevich GA. Research of the degree of radioactive contamination of food forest products and its contribution to the radiation burden of the population. Proceedings of the Belarusian State Technological University. 2018;1(2): 251–8. (In Russian).
- Chernushevich GA, Azovskaya NO, Domnenkova AV, Kiselev SV. Analysis of the influence of radioactive contamination of non-timber forest resources on the internal exposure of the population. Proceedings of the Belarusian State Technological University. 2021;1(2): 298–305. (In Russian).
- Panov AV, Marochkina EV, Ponomarenko VV. On the role of mushrooms in the internal dose formation to the population in the Chernobyl NPP accident affected areas. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 63–70. (In Russian).
- Russians are consuming less and less dairy products. Available from: https://milknews.ru/analitika-rinka-moloka/rinok-molokavRossii/Rossijane_potreblyajut_vse_menshe_molochnoj_produkcii.html (Accessed 30.04.2023). (In Russian).
- Martischenkova EV. Level of the rural population awareness about the rules for consuming products from rivers and reservoirs in regions affected by the Chernobyl accident. In: Modern problems of radiation medicine: from science to practice. Gomel: State Institution Republican Scientific and Practical Center for Radiation Medicine and Human Ecology; 2020. P. 38–39. (In Russian).
- Podval'skaya VS. Level of public awareness about ways to reduce radionuclides concentration in wild plants, berries and mushrooms (based on the results of a sociological survey of the rural population of areas affected by the Chernobyl accident). In: Modern problems of radiation medicine: from science to practice. Gomel: State Institution Republican Scientific and Practical Center for Radiation Medicine and Human Ecology; 2020. P. 44–45. (In Russian).
- Onishchenko GG, Popova AYU. (eds.). Radiological and hygienic issues of the mitigation of the Chernobyl NPP accident consequences. Saint Petersburg: Federal Scientific Organization Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev; 2016. Vol. 1. 448 p. (In Russian).
- Tsygvintsev PN, Tsurankov EN. Influence of information of the rural population on the formation of doses of internal radiation. In: Radioecological consequences of radiation accidents: Collection of reports of the international scientific and practical conference to the 35th anniversary of the Chernobyl accident. Obninsk: Federal State Budgetary Institution "All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology"; 2021. P. 383–387. (In Russian).
- Aheyeva TN, Miarzlova VA. On radiation doses to the population of the Mogilev region in zones of radioactive contamination. In: Radioecological consequences of radiation accidents: Collection of reports of the international scientific and practical conference to the 35th anniversary of the Chernobyl accident. Obninsk: Federal State Budgetary Institution "All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology"; 2021. P. 166–168. (In Russian).
- Jacoba 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.
- Natural resources and environment of the Bryansk region: Annual report on the environmental situation in the Bryansk region in 2018. Bryansk: Department of Natural Resources and Ecology of the Bryansk Region; 2019. 266 p. (In Russian).
- Natural resources and environment of the Bryansk region: Annual report on the environmental situation in the Bryansk region in 2019. Bryansk: Department of Natural Resources and Ecology of the Bryansk Region; 2020. 276 p. (In Russian).
- Natural resources and environment of the Bryansk region: Annual report on the environmental situation in the Bryansk region in 2020. Bryansk: Department of Natural Resources and Ecology of the Bryansk Region; 2021. 253 p. (In Russian).
- Nilova EK, Bortnovsky VN, Tagai SA, Dudareva NV, Nikitin AN. Assessment of the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl NPP exclusion zone (case study: the Bragin district of the Gomel region, Belarus). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 25–37. (In Russian).
- Nilova EK, Bortnovsky VN, Tagai SA, Dudareva NV, Nikitin AN. ^{241}Am and ^{137}Cs in the Khoyniki district of Belarus: updated radiological assessment of the local existing exposure situation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 17–30. (In Russian).

Received: October 26, 2023

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

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

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

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

Ksenia V. Varfolomeeva – junior researcher of the ecology laboratory of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Elena A. Drozdova – Leading Research Engineer, Laboratory of Dosimetry of Natural Sources, 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

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

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

Tatyana A. Kormanovskaya – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Dosimetry of Natural Sources, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

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

Alexander V. Kudryashov – chief physician of the branch of the Center of Hygiene and Epidemiology in Klinty, Bryansk region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Klinty, Bryansk region, Russia

Andrey A. Ladik – expert-physicist on control over sources of ionizing and non-ionizing radiation of the branch of the Center of Hygiene and Epidemiology in Klinty, Bryansk region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Klinty, Bryansk region, Russia

Vartan A. Lalayan – Deputy Chief Doctor for Sanitary and Epidemiological Issues of the Hygiene and Epidemiology Center branch in Klinty, Bryansk region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Klinty, Bryansk region, Russia

For citation: Romanovich I.K., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Bruk G.Ya., Varfolomeeva K.V., Drozdova E.A., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kormanovskaya T.A., Kravtsova O.S., Kudryashov A.V., Ladik A.A., Lalayan V.A. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 2: Population's food preferences (diet). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 7-21. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-7-21

Разработка автоматизированной системы анализа радиационных рисков: цели, задачи и перспективы развития

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

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

В настоящей статье описаны предпосылки создания и процесс разработки автоматизированной информационно-аналитической системы анализа радиационных рисков. Определены 3 основных цели разработки автоматизированной системы анализа радиационных рисков: создание инструмента для разработки и научного обоснования гигиенических нормативов и иных защитных величин в области использования ионизирующих излучений; практическая реализация принципов обоснования и оптимизации радиационной защиты на основе монетарной оценки радиационных рисков для здоровья; сравнительный анализ рисков различной природы на основе сопоставимых показателей популяционного здоровья. В качестве среды разработки автоматизированной информационно-аналитической системы анализа радиационных рисков была выбрана отечественная программная платформа «ИС: Предприятие». Выбор данной платформы был связан с упрощением интеграции с другими автоматизированными системами, разрабатываемыми в Научно-исследовательском институте радиационной гигиены имени П.В. Рамзаева, такими, как Автоматизированная информационно-аналитическая система контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора. Перед началом практической реализации системы были определены основные параметры с точки зрения ее взаимодействия с пользователем — взаимное расположение элементов пользовательского интерфейса, основные входные параметры, первичные вычисляемые показатели и выводимые результаты расчета и т.п. В системе был реализован расчет значений годового прироста вероятности возникновения радиационно-индуцированных злокачественных новообразований в зависимости от органической дозы облучения, пола и возраста облученного лица и других параметров по моделям Научного комитета ООН по действию атомной радиации, Агентства по защите окружающей среды США и Публикаций 103 и 152 Международной комиссии по радиологической защите. Возможности системы включают расчет значений ряда современных показателей пожизненного радиационного риска, применяемых для характеристики риска в различных научных публикациях в течение последних 35 лет, в том числе расчет популяционных рисков на основе национальных медико-демографических данных нескольких десятков государств, опубликованных за последние 50 лет.

Ключевые слова: радиационный риск, радиационный ущерб, автоматизированная система, оценка риска для здоровья, анализ рисков.

Введение

Управление рисками является одним из 3 основных этапов в классической схеме анализа рисков, наряду с оценкой рисков и риск-коммуникацией (информированием о рисках) [1]. В области обеспечения радиационной безопасности (РБ) населения в настоящее время все 3 этапа сводятся к сильно упрощенным и потому весьма эффективным на практике процедурам. На регулярной основе оценка радиационных рисков на популяционном уровне осуществляется лишь в рамках системы радиационно-гигиенической паспортизации территорий по достаточно простой схеме. Управление риском сводится к контролю соблюдения основных пределов доз и в небольшой степени к решению задач оптимизации

радиационной защиты (РЗ) в рамках некоторых видов деятельности. А риск-коммуникация вообще зачастую осуществляется лишь номинально, с целью получения подписи на документе (добровольном информированном согласии) о том, что человек проинформирован о возможном риске для здоровья в тех ситуациях, когда информирование о риске необходимо в рамках соблюдения действующего законодательства.

Главная причина оправданности использования упрощенных схем оценки риска при решении рутинных задач заключается в достаточно высоких стандартах безопасности в области использования ионизирующих излучений, по сравнению с некоторыми другими вредными факторами среды обитания. Допустимые уровни облучения

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

населения в большинстве повседневных ситуаций настолько низки, что не требуют высокой точности оценки и следования сложным математическим процедурам для расчета риска.

Подобное положение дел, однако, отрицательно сказывается на уровне компетенции специалистов по РБ [2] и зачастую приводит к «слепому» копированию в российские нормативные документы базовых рекомендаций авторитетных международных организаций без детального изучения более широких возможностей применения таких рекомендаций. Одной из значимых причин такой ситуации является также достаточно узкий круг отечественных специалистов в области оценки радиационного риска. Еще одна причина заключается в отсутствии простых и доступных широкому кругу специалистов инструментов анализа радиационных рисков, в которых у широкого круга специалистов просто нет надобности при решении повседневных задач.

Существующие информационные системы по оценке рисков либо нацелены на решение достаточно узкого круга задач, например, на оценку профессиональных рисков [3], либо направлены на построение моделей риска на основе результатов эпидемиологических исследований [4].

Цель исследования – описание опыта разработки прикладной информационной системы на примере автоматизированной информационно-аналитической системы (АИАС) анализа радиационных рисков¹, предназначенной для решения широкого круга прикладных научно-практических задач в области анализа радиационных рисков в различных ситуациях и при различных сценариях облучения населения и персонала с использованием современных моделей межпопуляционного переноса радиационных рисков. В статье рассмотрены предпосылки создания, основной функционал Системы и возможные пути ее дальнейшего развития.

Предпосылки создания АИАС анализа радиационных рисков

Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) разработала величину эффективной дозы в качестве меры риска возникновения отдаленных последствий облучения человека для решения задач по управлению радиационными рисками в области малых доз ионизирующего излучения. При этом в качестве показателя радиационного риска в области радиационной защиты МКРЗ рекомендует использовать величину, называемую радиационным ущербом. Данная величина рассчитана МКРЗ для так называемой «номинальной популяции» — т.е. популяции, искусственно «созданной» для данного расчета путем приписывания ей значений медико-демографических показателей, усредненных по нескольким реально существовавшим на момент расчета популяциям. В ситуации управления повседневными техногенными радиационными рисками в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующих излучений (ИИИ) такой подход вполне оправдан для применения в национальных системах РЗ, т.к. речь идет о годовых дозах облучения порядка 1–5 мЗв эффективной дозы и погрешности подхода не оказывают влияния на решения,

принимаемые с использованием такого метода оценки риска.

Тем не менее, практика использования ИИИ не ограничивается диапазоном очень малых доз облучения, получаемых более или менее равномерно в течение года. В ситуациях воздействия природных источников, профессионального облучения персонала радиационных объектов и при медицинском облучении пациентов приходится сталкиваться с более высокими дозами и/или с ситуациями острого облучения. В таких ситуациях целесообразно использовать специализированные методы оценки для решения задач по управлению рисками.

Авторами отечественных научных публикаций периодически предпринимаются попытки оценить эффект расчета радиационных рисков с использованием отечественных медико-демографических данных (МДД) в моделях НКДАР ООН, МКРЗ и др. [5–7]. Подобные публикации представляют несомненный научный интерес, однако имеют скорее теоретическое, нежели прикладное значение. Однако круг актуальных прикладных задач в области оценки рисков для здоровья постоянно расширяется и в настоящее время включает в себя:

- сравнительный анализ рисков различной природы;
- анализ зависимости рисков от пола и возраста;
- выбор наиболее адекватных решаемым задачам моделей риска;
- выбор показателей риска, позволяющих дать наиболее полную характеристику рисков и т.д.

Последняя задача стала еще более актуальной в связи с активным развитием системы показателей популяционного здоровья [8]. Выход Публикации 152 МКРЗ [9] подчеркнул, какое внимание уделяется методологии оценки радиационного риска, и предвещал дальнейшее развитие данной методологии.

В связи с вышесказанным важность создания современной системы анализа радиационных рисков, доступной отечественным специалистам в области радиационной защиты и радиационной гигиены, не вызывает сомнений. На основе анализа наиболее актуальных направлений развития методологии оценки рисков для здоровья [9] были определены 3 главные цели создания автоматизированной системы анализа радиационных рисков как инструмента для решения следующих задач:

- разработка и научное обоснование гигиенических нормативов и иных защитных величин в области использования ионизирующих излучений;
- практическая реализация принципов обоснования и оптимизации РЗ на основе монетарной оценки радиационных рисков для здоровья;
- сравнительный анализ рисков различной природы на основе сопоставимых показателей популяционного здоровья.

Однако при создании такой системы хотелось избежать ограничений, накладываемых классическим методом разработки программ, при котором все функции, системы обработки и хранения данных, отчетные формы и механизмы взаимодействия с пользователем жестко определены заранее и не могут быть изменены в процессе разработки.

¹ В рамках статьи обозначения «АИАС анализа радиационных рисков» и «Система» используются как синонимы.

Разработка АИАС анализа радиационных рисков

Создание современной автоматизированной информационно-аналитической системы предполагает гибкий подход к разработке, поэтому АИАС анализа радиационных рисков изначально задумывалась как «живая», расширяемая, постоянно развивающаяся система. При этом одна из задач, которую поставили перед собой разработчики Системы, заключалась в максимально быстром обеспечении возможности выполнения реальных расчетов и в постепенной реализации вычислительных алгоритмов по принципу от простого к сложному. Подобный подход позволяет выявлять ошибки и неудобства использования программы параллельно с процессом разработки и вносить предложения по внесению изменений в перечень текущих работ еще до ввода Системы в эксплуатацию.

В качестве среды разработки АИАС анализа радиационных рисков была выбрана отечественная программная платформа «1С: Предприятие». Выбор данной платформы был обоснован необходимостью обеспечения интеграции с другими автоматизированными системами, разрабатываемыми во ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева,

такими как Автоматизированная информационно-аналитическая система контроля радиационного воздействия (АСКРВ Роспотребнадзора) [10].

Процесс создания Системы начался с определения функционального назначения, структурной схемы будущей Системы (рис. 1) и требований к интерфейсу пользователя. К настоящему времени завершено создание 3 из 4 подсистем. Разработка подсистемы формирования отчетов запланирована на 2024 г.

Уже на начальном этапе проектирования Системы представлялось очевидным, что не следует ограничивать ее функционал слишком жесткими заранее определенными рамками, как это принято в классических моделях разработки программного обеспечения [11]. Вместо этого предпочтение было отдано более гибкому подходу. При этом в процессе реализации конкретных функциональных возможностей использовался подход, позволяющий вносить улучшения в Систему буквально на лету, что более свойственно гибким методологиям разработки [11], не выходя при этом за рамки основного функционала и требований к интерфейсу пользователя. Функционал

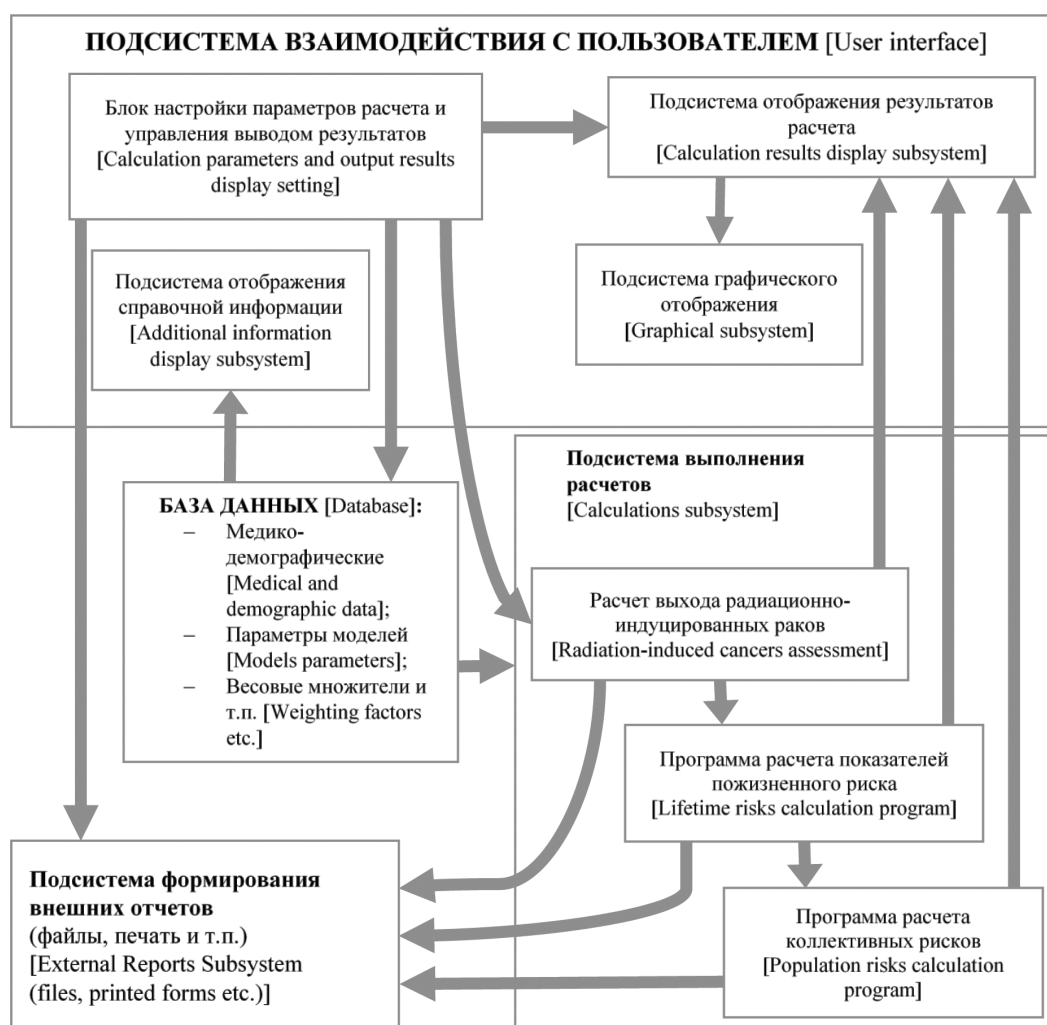


Рис. 1. Структурная схема АИАС анализа радиационных рисков
[Fig. 1. Structural scheme of the Automated System for Radiation Risk Analysis]

Системы наращивался постепенно, и разработчики смогли решать (и в настоящее время продолжают решать) параллельно несколько задач:

- по мере реализации функционала системы практически сразу стало возможным производить первые вычисления, т.е. использование Системы для выполнения первых расчетов стало возможным буквально за 2–3 месяца;

- это, в свою очередь, позволило отлаживать вычислительные алгоритмы и производить сверку расчетов, не прерывая ход разработки;

- в процессе пробной эксплуатации и испытания частичного функционала оценивалось удобство доступа к элементам интерфейса и наглядность представления результатов расчета.

Таким образом, к моменту государственной регистрации² веб-приложения АИАС анализа радиационных рисков уже был накоплен определенный опыт выполнения расчетов и эксплуатации, учтены и исправлены некоторые выявленные недочеты. Оправданность выбранного подхода подтвердилась, когда в связи с выходом Публикации 152 МКРЗ [9] в программе была максимально быстро реализована именно модель риска, описанная в данной публикации, вместо предполагавшейся (и реализованной) изначально модели из Публикации 103 МКРЗ [12]. В ином случае к моменту ввода в эксплуатацию в Системе была бы реализована содержащая ошибки и уже устаревшая модель межпопуляционного переноса радиационного риска. Отметим, что предусмотреть выход указанной публикации в момент планирования НИР было принципиально невозможно, т.к. работа была запланирована более чем 3 годами ранее.

На первом этапе практической реализации Системы были определены основные параметры системы с точки зрения ее взаимодействия с пользователем: взаимное расположение элементов пользовательского интерфейса, основные входные параметры, первичные вычисляемые показатели и выводимые результаты расчета и т.п. Прежде всего, был реализован расчет значений годового прироста вероятности возникновения радиационно-индуцированных злокачественных новообразований (рис. 2) в зависимости от органной дозы облучения, пола и возраста облученного лица и других параметров по моделям НКДАР ООН [13], ЕРА [14] и МКРЗ [12], замененной на МКРЗ [9] в связи с уточнением параметров расчета и выявленными ошибками в описании модели.

Отдельно отметим, что перечень конкретных органов, тканей и систем организма несколько отличается в названных выше моделях, поэтому для обеспечения сравнимости результатов был решен ряд методических задач. Наиболее существенная разница в расчетах наблюдается в группе «Другие солидные злокачественные новообразования», т.к. перечень органов, попадающих в категорию «Другие» в указанных моделях, несколько различается. Помимо этого, в приведенных публикациях используются несколько отличающиеся параметры: значения мини-

мального латентного периода, значения коэффициента эффективности дозы и мощности дозы (DDREF) и др. Поэтому для повышения информативности анализа было решено добавить возможность ручной настройки некоторых параметров расчета.

На этом же этапе был реализован расчет значений ряда показателей пожизненного риска, применяемых для характеристики риска в различных публикациях в последние 35 лет (см. рис. 2). К их числу относятся:

- LAR (Lifetime Attributable Risk – пожизненный атрибутивный риск);
- ECI (Excessive Cancer Incidence – избыточная онкологическая заболеваемость);
- ECD (Excessive Cancer Deaths – избыточная онкологическая смертность);
- REID (Risk of Exposure-Induced Death – риск смерти вследствие облучения);
- REIC (Risk of Exposure-Induced Cancer incidence – риск возникновения ЗНО вследствие облучения);
- YLL (Years of Life Lost – число потерянных вследствие облучения лет жизни);
- YLL RIC (Years of Life Lost per Radiation Induced Cancer – число потерянных вследствие облучения лет жизни на одно вызванное облучением онкологическое заболевание);
- YLD (Years Lived with Disability – число лет, прожитых в состоянии неполного здоровья вследствие облучения, взвешенное по степени тяжести состояния неполного здоровья);
- DALY (Disability-Adjusted Life Years – число лет здоровой жизни, потерянных вследствие облучения) и др.

Одной из особенностей описания моделей радиационного риска в публикациях зарубежных и международных научных организаций является возможность различного подхода к реализации предлагаемых в них формул, что в некоторых случаях может существенным образом повлиять на результаты вычислений. Так, например, медико-демографические показатели представлены в формулах как значения непрерывных функций, зависящих от конкретного возраста, тогда как на практике указанные показатели могут быть доступны для возрастных групп от 0 до 4 лет, от 5 до 9 лет и т.д. Еще большее значение может иметь представление медико-демографических показателей в самой старшей возрастной группе, т.к. показатели онкологической заболеваемости и смертности существенно возрастают для лиц пожилого возраста, а демографические модели не позволяют достаточно хорошо аппроксимировать указанные показатели при помощи непрерывных функций.

Поэтому одной из важных задач в ходе практической реализации моделей риска является проверка результатов расчетов, получаемых при использовании разрабатываемых программных средств с использованием тех же исходных данных, результаты расчета с помощью которых опубликованы разработчиками модели. Однако и в этом

² Программа для ЭВМ «Автоматизированная информационно-аналитическая система анализа радиационных рисков». Свидетельство о государственной регистрации № 2023680449. Дата регистрации: 29.09.2023 г. [Computer program "Automated information and analytical system for radiation risk analysis". Certificate of State Registration No. 2023680449. Registration date: 29.09.2023. (In Russ.)]

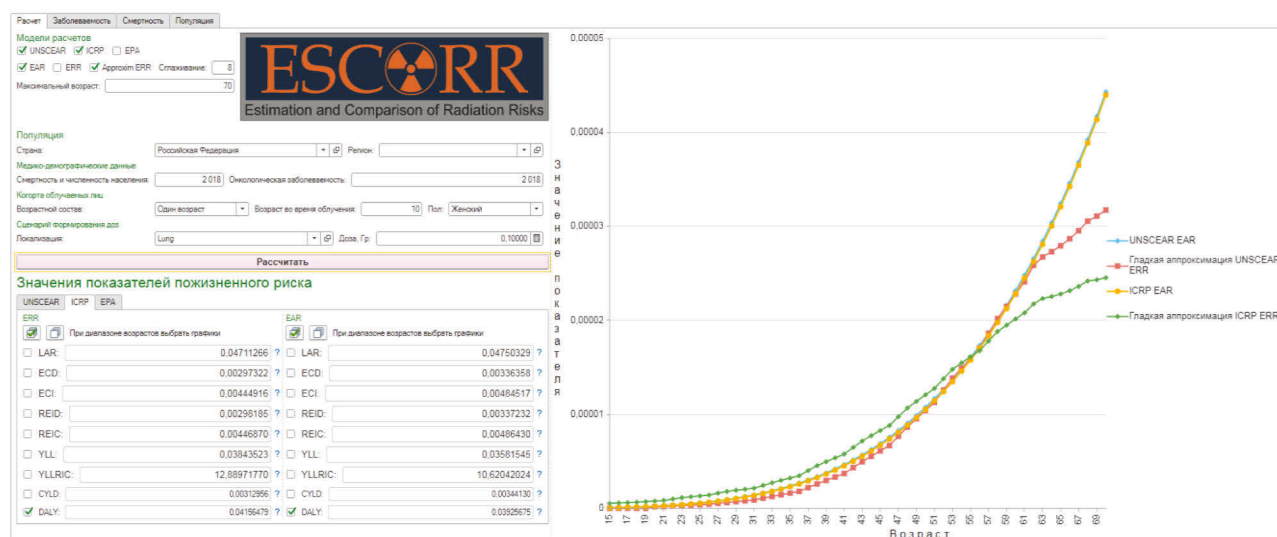


Рис. 2. Расчет вероятности выявления радиационно-индуцированных ЗНО легких по моделям МКРЗ и НКДАР ООН в различных возрастах дожития

[Fig. 2. Calculation of the probability of identifying radiation-induced lung cancer according to the ICRP and UNSCEAR models at different ages of survivorship]

случае зачастую не удается получить точно такие же результаты, как у авторов модели. Причина кроется в том, что результаты расчетов и некоторых параметров приводятся разработчиками моделей в округленном виде.

Таким образом, единственной реальной возможностью проверки программной реализации является тестирование программируемых моделей на степень согласованности получаемых результатов с результатами, опубликованными авторами моделей.

Для решения этой задачи использовался следующий подход. Первоначально модель реализовывалась в математическом пакете с использованием языка Wolfram. Преимущество использования данного пакета по сравнению со средой разработки «1С: Предприятие» заключается в возможности задания функций в аналитическом виде, т.е. в виде математических формул, с помощью которых описаны модели (рис. 3), что существенно снижает риск ошибки в записи формулы по сравнению с реализацией расчета в виде пошагового компьютерного алгоритма.

При описанном подходе поиск возможных ошибок реализации не потребовал внесения существенных правок в программный код и не отнял большого количества времени. После того как получаемые результаты достигли приемлемого уровня согласованности с опубликованными авторами модели результатами, алгоритм расчета был реализован в среде «1С: Предприятие», где сверка результатов осуществлялась уже с результатами, полученными при использовании языка Wolfram и среды разработки Mathematica. При этом использовались одни и те же данные для расчетов, и результаты вычислений были проверены на полное совпадение (рис. 4).

Следует отметить, что поскольку опубликованные авторами моделей результаты оценки риска используют МДД различных популяций, в Системе было предусмотрено агрегирование доступных сведений о половозрастной структуре, онкологической заболеваемости, онкологической и общей смертности для большого числа

различных популяций за период до 50 лет, включая и российские МДД за период до 30 лет.

После реализации расчета показателей пожизненного риска был реализован расчет значений популяционного риска, т.е. рассчитываемые показатели взвешивались с учетом доли лиц определенного пола и возраста в структуре заданной возрастной группы выбранной популяции.

Описанные выше этапы реализации алгоритмов расчета основных показателей риска были реализованы в виде веб-приложения, доступ к которому осуществляется с помощью стандартной программы обозревателя сети Интернет. Именно в таком формате в ежедневном режиме сотрудниками информационно-аналитического центра НИИ радиационной гигиены осуществляется тестирование АИАС анализа радиационных рисков и формируется перечень задач и предложений по дальнейшему усовершенствованию Системы.

Первой практической задачей, решенной с помощью АИАС анализа радиационных рисков, стал расчет половозрастных значений показателя DALY при различных видах компьютерно-томографических исследований [15].

Дальнейшее развитие АИАС анализа радиационных рисков

Дальнейшее развитие функциональных возможностей АИАС анализа радиационных рисков осуществляется по 2 основным направлениям:

- решение задач в соответствии с планом НИР;
- решение задач по запросам научного сообщества и по инициативе разработчиков системы.

Для обоих направлений существует обязательное требование: расширение функционала Системы не должно приводить к существенному изменению схемы взаимодействия с ней пользователей.

Основные задачи, предусмотренные планом НИР, – это развитие системы формирования отчетов и создание мобильной версии приложения. Планы же разработчиков

B4. The measure of years of life lost (YLL) per unit dose is given by:

$$YLL_c(s, a, D_t) = \frac{\int_a^{y_r} S(s, t | a) dt - \int_a^{y_r} S_c(s, t | a, D_t) dt}{D_t}$$

As above, when a relative risk model, $\mu_c(s, t | a, D_t) = \mu_c(s, t) \cdot [1 + ERR_c(s, a, y, D_t)]$, is assumed, this reduces to:

$$YLL_c(s, a, D_t) = \frac{\int_a^{y_r} \exp \left[- \int_a^t \mu(s, w) dw \right] dt - \int_a^{y_r} \exp \left[- \int_a^t \mu(s, w) + \mu_c(s, w) \cdot RR_c(s, a, w - a, D_t) dw \right] dt}{D_t}$$

This measure has been used by many scientific committees [C35, I11, U2, U4] and others [L15, L16, L17]. A related measure, years of life lost per radiation-induced cancer (YLLRIC), which is given by:

$$YLLRIC_c(s, a, D_t) = \frac{YLL_c(s, a, D_t)}{REID_c(s, a, D_t)}$$

```

REID[m_, ar_, c_, d_, sex_, e_Integer] :=  $\frac{\sum_{a=0}^{maxage} (\mu_c[m, ar, c, d, sex, e, a] - mortRate[a, c, sex, m]) \times Sc[m, ar, c, d, sex, e, a]}{d}$ ;
REIC[m_, ar_, c_, d_, sex_, e_Integer] /; !m == "I" := REIC[m, ar, c, d, sex, e] =  $\frac{\sum_{a=0}^{maxage} (\mu_c[m, ar, c, d, sex, e, a] - incidence[a, c, sex, m]) \times Sic[m, ar, c, d, sex, e, a]}{d}$ ;
REIC[m_, ar_, c_, d_, sex_, e_Integer] /; m == "I" := REIC[m, ar, c, d, sex, e] =  $\frac{\sum_{a=0}^{maxage} (\mu_c[m, ar, c, d, sex, e, a] - incidence[a, c, sex, m]) \times Sic[m, ar, c, d, sex, e, a]}{d}$ ;

YLL[m_, ar_, c_, d_, sex_, e_Integer] :=  $\frac{\sum_{a=0}^{maxage} (S(sex, e, a) - Sc[m, ar, c, d, sex, e, a])}{d}$ ;
YLLRIC[m_, ar_, c_, d_, sex_, e_Integer] /; !REID[m, ar, c, d, sex, e] == 0 := YLLRIC[m, ar, c, d, sex, e] =  $\frac{YLL[m, ar, c, d, sex, e]}{REID[m, ar, c, d, sex, e]}$ ;
YLLRIC[m_, ar_, c_, d_, sex_, e_Integer] /; REID[m, ar, c, d, sex, e] == 0 := YLLRIC[m, ar, c, d, sex, e] = 0;

```

Рис. 3. Фрагмент описания расчета показателей пожизненного риска в модели НКДАР ООН (сверху) [13] и его программная реализация на языке Wolfram (снизу)
 [Fig. 3. Fragment of the description of calculation of lifetime risk indicators with the UNSCEAR model (top) [13] and its program implementation in Wolfram language (bottom)]

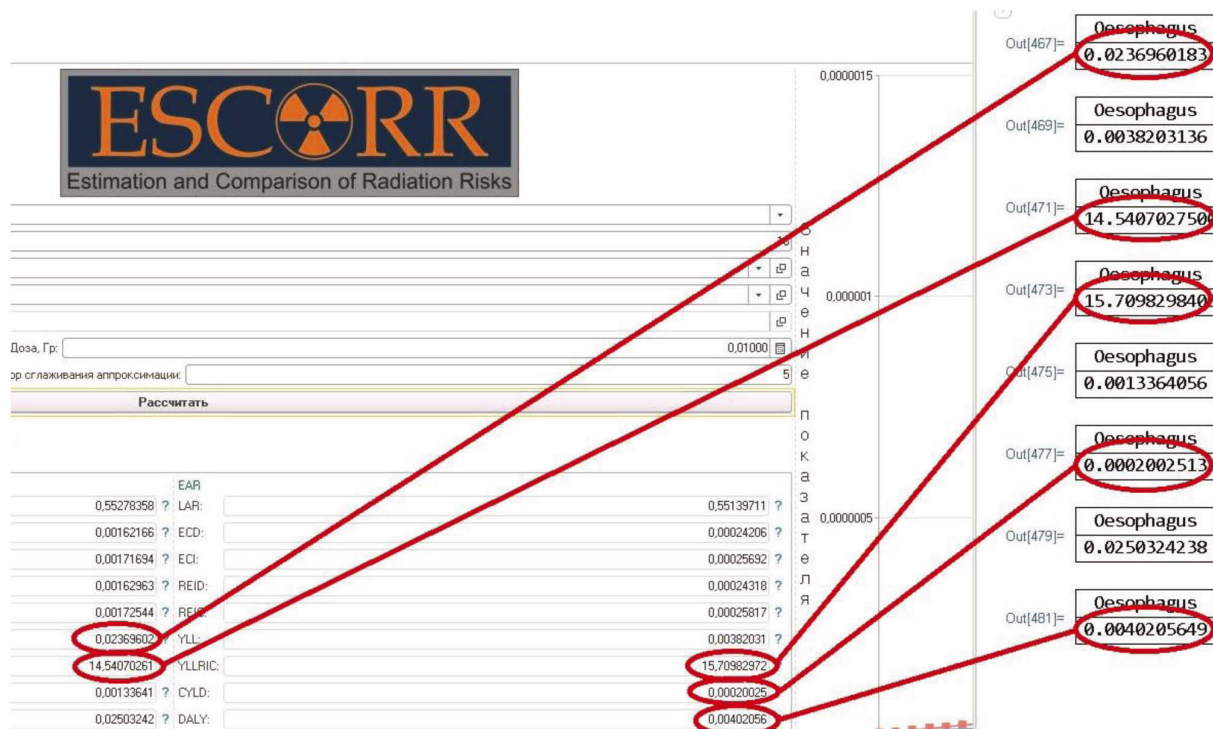


Рис. 4. Сверка результатов расчета показателей пожизненного риска, вычисляемых в АИАС анализа радиационных рисков (слева) и при помощи программы на языке Wolfram (справа)
 [Fig. 4. A comparison of the calculation results of lifetime risk indicators calculated in the AIAS for radiation risk analysis (left) and using the Wolfram program (right)]

несколько шире и включают в себя следующие направления развития Системы:

- реализация различных методик оценки риска;
- увеличение числа сценариев облучения (однократного, пролонгированного, фракционированного и т.п.), геометрий облучения и моделей формирования органических доз облучения в динамике;
- расширение перечня показателей радиационного риска и популяционного здоровья, используемых для характеристики рисков;
- регулярное пополнение базы МДД, используемых для расчета, путем включения данных различных популяций за различные годы;
- использование более сложных математических моделей для описания демографических процессов, возможность использования как продольных, так и поперечных МДД при расчетах;
- расширение вариантов ввода данных для расчета, загрузка сведений из файлов, ручной ввод данных для расчета, развитие механизмов сверки расчетов и контроля ввода данных и т.п.;
- развитие инструментария сравнительного анализа рисков различной природы.

Заключение

Разработанная и развиваемая в рамках отраслевой НИР АИАС анализа радиационных рисков нацелена, в первую очередь, на решение прикладных научно-практических задач в области обеспечения радиационной безопасности населения. Создаваемая Система может использоваться и в качестве удобного и доступного в будущем для специалистов инструмента при проведении научных исследований в области анализа рисков для здоровья.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин Л.В. разработал план публикации, определил цели и задачи, написал черновик рукописи.

Ахматдинов Р.Р. подготовил иллюстративный материал, редактировал промежуточный вариант рукописи.

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

Репин В.С. осуществлял общее руководство подготовкой статьи, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «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. Онищенко Г.Г., Зайцева Н.В., Май И.В. и др. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография / под общ. ред. Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. М.: Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. 738 с.
2. Davydov A., Biblin A., Repin L. et al. Features of the perception of radiation risks by Russian radiation safety specialists. Proceedings of the 14th International conference on medical physics. Kaunas, Lithuania. 2019. P. 27-30.
3. Иванов В.К., Корело А.М., Туманов К.А. и др. Мониторинг профессиональных радиационных рисков работников атомной промышленности (система АРМИР) // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2016. Т. 25, № 1. С. 16-24.
4. Preston D., Lubin J., Pierce D., McConney M. Epicure Users Guide. Hirosoft, Seattle, WA. 1993.
5. Репин Л.В. Оценка радиационного ущерба для здоровья: о возможности использования эффективной дозы для расчета числа потерянных лет здоровой жизни // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 52-65. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-1-52-6>.
6. Горский А.И., Чекин С.Ю., Максюттов М.А. и др. Эффект переноса моделей радиационного риска МКРЗ на популяцию РФ // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2019. Т. 28, № 4. С. 5-15.
7. Губин А.Т., Редько В.И., Сакович В.А. Адаптация моделей радиационного риска, используемых МКРЗ, к российскому населению // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 38-47.
8. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Репин В.С. О гармонизации показателей радиационного риска для здоровья и риска от воздействия иных вредных факторов на основе оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Анализ риска здоровью. 2022. № 1. С. 170-183. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.1.18>.
9. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152 // Annals of the ICRP. 2022. Vol. 51, No 3. 103 p.
10. Репин Л.В., Библин А.М., Ковалев П.Г. и др. Автоматизированная система контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора: история создания, назначение и развитие // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 44-53.
11. Шахина И.В., Муллин А.А., Алышев Ю.В. Agile vs Waterfall: разница между методологиями // StudNet. 2020. Т. 3, № 6. С. 9-15.
12. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2-4. 332 p.
13. UNSCEAR 2006 Report. Effects of ionizing radiation. New York. United Nations; 2009. 334 p.
14. NAS (National Academy of Sciences). Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR VII – Phase 2). Washington D.C.: National Academy Press; 2006.
15. 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. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-3-37-45>.

Поступила: 24.10.2023 г.

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

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-5234-2489

Для цитирования: Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Репин В.С. Разработка автоматизированной системы анализа радиационных рисков: цели, задачи и перспективы развития // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 22-31. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-22-31

Development of the Automated System for Radiation Risk Analysis: goals, tasks and the vision for progress

Leonid V. Repin, Rustam R. Akhmatdinov, Artem M. Biblin, Viktor S. Repin

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

This paper describes the preconditions of creation and the process of development of the Automated System for Radiation Risk Analysis. Three main objectives for the development of an automated system for radiation risk analysis were identified: creation of a tool for the development and scientific justification of hygienic standards and other protective quantities in the field of ionizing radiation application; practical implementation of the principles of justification and optimization in radiation protection on the basis of monetary assessment of radiation health risks; and comparative analysis of risks of different nature on the basis of comparable indicators of population health. The Russian software platform 1C: Enterprise was chosen as the development platform for the Automated System for Radiation Risk Analysis. The choice of this platform was related to simplification of integration with other computer systems being developed at the Research Institute of Radiation Hygiene after Prof. P.V. Ramzaev, such as the Automated System for Radiation Exposure Control of Rospotrebnadzor. Before the practical development of the system in accordance with the terms of reference, the main parameters in view of its interaction with the user were determined: arrangement of the user interface elements, main input parameters, primary calculated indicators and output calculation results, etc. The estimation of annual increase in the probability of radiation-induced malignant neoplasms depending on the organ dose, sex and age of the exposed person and other parameters according to the models of the UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, the U.S. Environmental Protection Agency and Publications 103 and 152 of the International Commission on Radiological Protection was implemented in the system. The capabilities of the system include calculation of a number of modern lifetime radiation risk indicators used for risk characterization in various scientific publications over the last 35 years, including

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

calculation of population risks based on national medical and demographic data of several dozen states published over the last 50 years.

Key words: radiation risk, radiation detriment, automated system, health risk assessment, risk analysis.

Personal contribution of authors

Repin L.V. developed design of the study, determined aims and objectives, prepared draft of the manuscript.

Akhmatdinov R.R. prepared illustrations, 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.

Repin V.S. provided supervision of the study, edited the draft of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was performed within framework of research project "Development and scientific 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. Onischenko GG, Zaytseva NV, May IV, Shur PZ, Popova AY, Alekseev VB, et al. Health risk analysis in the strategy of state social and economic development: monograph. Perm: Publishing house of Perm National Research Polytechnic University; 2014. 783 p. (In Russian).
2. Davydov A, Biblin A, Repin L, Vishnyakova N, Vodovatov A. Features of the perception of radiation risks by Russian radiation safety specialists. Proceedings of the 14th International conference on medical physics. 7 – 9 November 2019, Kaunas, Lithuania; 2019. P. 27-30.
3. Ivanov VK, Korelo AM, Tumanov KA, Chekin SYu, Adamchik SA, Mikheenko SG, et al. Monitoring of occupational radiation risks of nuclear industry workers (ARMIR system). *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2016;25(1): 16-24. (In Russian).
4. Preston DL, Lubin JH, Pierce DA, McConney ME. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.
5. Repin LV. Radiation detriment estimation: on the possibility of effective dose usage to assess the number of years of the healthy life lost. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 52-65. (In Russian). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-1-52-65>.
6. Vlasov OK, 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*. 2016;28(4): 5-15. (In Russian). <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15>.
7. Gubin AT, Redko VI, Sakovich VA. Adaptation to the Russian population types of radiation risk used by ICRP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 38-47. (In Russian).
8. Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Repin VS. On harmonization of health risk indicators caused by ionizing radiation exposure and other harmful factors based on DALY estimates. *Analiz riska zdorov'yu = Health Risk Analysis*. 2022;1: 162-175. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.1.18.eng>.
9. Radiation detriment calculation methodology. ICRP. ICRP Publication 152. 2022. *Annals of the ICRP*. 2022;51(3): 103.
10. Repin LV, Biblin AM, Kovalev PG, Nikolaevich MS, Repin VS. The Automated System of Radiation Exposure Control (ASCRES) for Rospotrebnadzor: creation history, applicability and development. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 44-53. (In Russian).
11. Shakhina IV, Mullin AA, Alyshev UV. Agile VS Waterfall: difference between methodologies. *StudNet*. 2020;3(6): 9-15. (In Russian).
12. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 332.
13. UNSCEAR 2006 Report. Effects of ionizing radiation. New York. United Nations; 2009. 334 p.
14. NAS (National Academy of Sciences). Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR VII – Phase 2). Washington D.C.: National Academy Press; 2006.
15. Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Vodovatov AV, Chipiga 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). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-3-37-45>.

Received: October 24, 2023

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 Well-Being (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 Well-Being, 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0002-3139-2479

Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology 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: 0000-0002-5234-2489

For citation: Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Repin V.S. Development of an Automated System for Radiation Risk Analysis: goals, tasks and the vision for progress. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 22-31. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-22-31

Оценка эффективных доз при проведении баллонной пластики пищевода у детей

Ю.Н. Капырина¹, А.В. Водоватов^{1,2}, В.Г. Пузырев¹, М.И. Комиссаров¹, И.Ю. Алешин¹,
В.Ю. Голиков², В.И. Орел¹

¹ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет,
Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

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

Интервенционные исследования связаны с высокими уровнями облучения пациентов, что обуславливает повышенное внимание к контролю доз пациентов, а также оценки радиационных рисков и вероятности развития детерминированных эффектов. Целью данного исследования являлась оценка эффективных доз при проведении интервенционных исследований на примере баллонной пластики пищевода, которую выполняли педиатрическим пациентам в возрасте от 1 до 2 лет на базе отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета. Модели облучения пациентов были разработаны на основе собственных данных. Расчет эффективных и органных доз пациентов, нормированных на значение произведения дозы на площадь, измеренного в ходе исследования, проводился с помощью программного обеспечения РСХМС 2.0. Значения коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе, определенные с использованием тканевых взвешивающих коэффициентов из Публикаций МКРЗ 60 и 103, составили 10,7 и 11,7 мкЗв/сГр х см² соответственно. Результаты верификации метода оценки эффективных доз на примере баллонной пластики пищевода показали, что использование несоответствующих коэффициентов перехода может приводить к недооценке эффективных доз детей в несколько раз. Различия в значениях коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе значительны и объясняются различиями в исходных параметрах используемого ангиографического аппарата, используемых параметрах напряжения, расстояния источник – приемник и размера поля облучения на самом пациенте. Для конкретной рассмотренной процедуры была предложена упрощенная модель облучения пациентов, описываемая одним полем облучения. Оценка эффективных доз с использованием многопольной и однопольной модели показала сопоставимые результаты, что позволяет в похожих случаях использовать дифференцированный подход к оценке доз облучения пациентов.

Ключевые слова: эффективная доза, коэффициенты перехода, интервенционные исследования, дети, медицинское облучение.

Введение

К интервенционным исследованиям относятся минимально инвазивные хирургические вмешательства, проводимые под контролем методов медицинской визуализации. В рамках данных исследований хирургические вмешательства сопровождаются получением рентгеновского изображения различных анатомических областей в режиме реального времени при облучении пациента в течение длительного времени. Этим исследованиям подвергаются как взрослые, так и педиатрические пациенты [1, 2, 3, 4]. Интервенционные исследования ассоциированы с высокими уровнями облучения пациентов, что обуславливает повышенное внимание к контролю доз пациентов, а также оценке

радиационных рисков и вероятности развития детерминированных эффектов [1, 2, 5–14].

Однако интервенционные исследования имеют ряд особенностей, которые обуславливают сложность оценки доз пациентов [7, 9, 15, 16, 17]. К ним можно отнести облучение пациента в режиме реального времени с изменением проекций облучения и наличием кранио-каудальных углов наклона рентгеновской трубки в рамках одного исследования. Кроме того, исследование включает в себя не только непрерывное облучение (рентгеноскопию), но и получение серий рентгеновских снимков (рентгенографию). В процессе облучения пациента происходит изменение анодного напряжения и анодного тока в режиме реального вре-

Капырина Юлия Николаевна

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет

Адрес для переписки: 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2; E-mail: kapirina-yuliya@yandex.ru

мени в зависимости от толщины и плотности анатомической области пациента для обеспечения постоянной мощности дозы на приемнике рентгеновского изображения. Важно отметить, что интервенционные исследования не являются стандартизованными, поэтому расположение области исследования, размер поля облучения, время просвечивания и количество этапов исследования определяются диагнозом, течением и проявлением патологического процесса пациента, его анатомическими особенностями, особенностями используемого аппарата, а также квалификацией и опытом работы персонала, выполняющего данное исследование [18, 19].

Существующие подходы к оценкам доз облучения пациентов при проведении интервенционных исследований, как правило, не подразумевают оценки эффективной дозы (зарубежные подходы): оценка уровней облучения пациентов проводится по измеренным дозовым характеристикам (произведению дозы на площадь, поглощенной дозе в коже и пр.). Расчеты эффективных доз, как правило, основываются на использовании коэффициентов перехода (КП) от произведения дозы на площадь к эффективной дозе.

В отечественной практике эффективные дозы у пациентов оценивают согласно МУ 2.6.1.3584-19¹ с помощью коэффициентов перехода от выбранных дозовых характеристик поля излучения к эффективной дозе. К сожалению, в МУ 2.6.1.3584-19 значения КП представлены преимущественно для взрослых пациентов. Для педиатрических пациентов даны лишь коэффициенты для наиболее часто проводимых коронарных исследований, и, как правило, геометрические модели облучения ограничены 1 полем (проекцией) облучения, а также упрощен учет физико-технических параметров проведения исследования. Недостатком данного метода является ограниченное количество представленных исследований, отсутствие специфики видов (методов) выбранных исследований, отсутствие учета реальных параметров (режимов) исследований, отсутствие учета характеристик используемого рентгеновского оборудования. Помимо этого, значения коэффициентов перехода, приведенные в МУ, могут использоваться только при условии соответствия параметров проведения исследования, для которого рассчитывается эффективная доза, указанным в МУ, и только для 1 анатомической области. Если в процессе выполнения рентгенологического исследования облучается несколько анатомических областей или 1 анатомическая область, но под разными углами (проекциями), использование существующего способа затруднительно.

Цель исследования – оценка эффективных доз для баллонной пластики пищевода [20–24], которую выполняли педиатрическим пациентам в возрасте от 1 до 2 лет.

Материалы и методы

Исследование было выполнено на базе отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения

Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета на примере баллонной пластики пищевода, которую выполняли педиатрическим пациентам в возрасте от 1 до 2 лет. Критериями выбора данного вида интервенционных исследований стали его наибольшая распространенность среди прочих в данном отделении (в 2021 г. вклад данных исследований по количеству процедур составил 35%) и отсутствие коэффициентов перехода для определения эффективной дозы пациентов с использованием утвержденных методик (МУ 2.6.1.3584-19). Сбор данных проводился в период с июля 2021 г. по август 2022 г.; в выборку вошло 11 пациентов (табл. 1).

Таблица 1

Общие сведения о пациентах, которым выполнялась баллонная пластика пищевода

[Table 1]

The data on patients with fluoroscopy-guided balloon dilatation of benign esophageal strictures

№ пациента [Patient]	Пол [Gender]	Возраст [Age]	Масса, кг [Weight, kg]
1	М [M]	8 мес. [8 months]	14,0
2	М [M]	8 мес. [8 months]	14,0
3	М [M]	1 год 7 мес. [1 year 7 months]	13,5
4	М [M]	7 мес. [7 months]	14,0
5	М [M]	8 мес. [8 months]	14,0
6	М [M]	1 год 3 мес. [1 year 3 months]	7,0
7	М [M]	1 год 10 мес. [1 year 10 months]	8,0
8	М [M]	1 год 10 мес. [1 year 10 months]	14,0
9	Ж [F]	1 год 8 мес. [1 year 8 months]	9,5
10	М [M]	1 год 11 мес. [1 year 11 months]	14,7
11	М [M]	1 год 5 мес. [1 year 5 months]	11,5

Исследования проводились на кардиоваскулярной системе визуализации Innova 3100/4100, GE Medical Systems с общей фильтрацией 3,5 мм Al + 0,3 мм Cu, типовой размер поля облучения для выбранного исследования составлял 30×30 см. Это устройство представляет собой дистанционно управляемый рентгеновский аппарат, оснащенный клиническими дозиметрами (ионизационными камерами) KermaX (Германия); дозиметры были откалиброваны при последнем проведении контроля эксплуатационных параметров. Данные, касающиеся всех параметров проведения исследований, собирались авторами вручную во время проведения исследований с использованием специально разработанных анкет. Помимо

¹ Методические указания МУ 2.6.1.3584-19. Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. М.: Роспотребнадзор, 2019. 32 с. [Methodical guidelines MU 2.6.1.3584-19. Control of the patient effective doses from X-ray diagnostic examinations. Moscow: Rosпотребнадзор; 2019. 32 p. (In Russ.)]

этого, данные о проведенных интервенционных исследованиях были экспортированы из цифрового архива рентгеновских изображений (PACS) и записаны в формате DICOM. Эти записи в дальнейшем использовались для построения модели облучения пациентов с помощью программного обеспечения РСХМС 2.0 и для проверки собранных данных.

Для построения расчетной модели в программе РСХМС 2.0. рентгенологическое исследование было преобразовано в набор типичных фаз рентгеноскопии и рентгенографии, определяемых исследуемой анатомической областью и проекцией облучения пациента. Каждая фаза представляла собой набор дискретных полей излучения, соответствующих местоположению определенных органов пациента. Если значительного перемещения рентгеновской трубки не происходило, то фаза состояла из одного поля облучения. Если же движение трубки было значительным, фаза состояла из нескольких полей, каждое из которых соответствовало определенной анатомической области [25]. Оценка значимости перемещения основывалась на:

- количестве и положении органов, облучаемых в рамках данной фазы рентгеноскопии (появлении новых органов в поле облучения или сокращении площади облучения органа более чем на 50%);
- изменении проекции облучения пациента;
- изменении расстояния источник – приемник, или угла наклона рентгеновской трубки более чем на 10%.

Построение расчетных моделей основывалось на данных, собранных авторами при участии и во взаимодействии с рентгенохирургами, проводящими исследование. Структура интервенционного исследования «Баллонная пластика пищевода» для детей в возрасте от 1 до 2 лет описывается 5 полями излучения в задне-передней проекции. В соответствии с этой геометрией в программном обеспечении РСХМС 2.0. была подготовлена расчетная модель облучения (табл. 2).

Ориентирами для первого поля облучения являются: верхняя граница поля облучения – верхняя челюсть; нижняя граница – верхний край печени и середина желудка; боковые границы – границы перикарда; при этом в поле видимости находится весь пищевод. Второе поле облучения смещено на 3–4 см влево относительно пациента по сравнению с полем облучения 1. Ориентиры для третьего поля облучения: верхняя граница поля облучения – верхняя стенка глазницы; нижняя граница – середина пери-

карда; боковые границы поля облучения – границы шеи. Четвертое поле облучения смещено вверх и на 3–4 см влево относительно пациента по сравнению с полем облучения 3. Верхняя граница пятого поля облучения – верхняя челюсть; нижняя граница – верхний край печени и середина желудка; боковые границы поля облучения – боковые поверхности грудной клетки.

На рисунках 1–5 показаны анатомические области и их границы для каждого из 5 полей излучения, смоделированные в программном обеспечении РСХМС 2.0.

Для каждого пациента собирали следующие параметры:

- общие сведения о пациенте:
 - дата рождения/ возраст;
 - антропометрические данные (вес, рост);
- физико-технические параметры проведения интервенционного исследования:
 - толщину и материал дополнительного фильтра (мм Al, мм Cu);
 - значение напряжения на рентгеновской трубке (кВ);
 - произведение дозы на площадь (ПДП, сГу×см²);
- геометрия облучения пациента:
 - положение рентгеновской трубки по отношению к столу (под столом, над столом);
 - проекция облучения (включая угол наклона рентгеновской трубки);
 - размеры поля облучения (см×см);
 - область исследования (грудная клетка, череп и т.п.);
 - расстояние от фокуса рентгеновской трубки до приемника изображения (см).

Координаты центра поля прямого излучения в системе координат программного обеспечения РСХМС 2.0 определяли совместно с рентгенохирургами, привязываясь к расположению органов и тканей, попадавших в поле облучения.

Данные по напряжению на трубке, ПДП и геометрии облучения пациента собирали для каждого этапа и способа облучения (рентгеноскопии и рентгенографии, поле излучения). Для каждого из выбранных полей излучения, представляющих расчетную модель исследования с ее физико-техническими параметрами, с помощью программы РСХМС 2.0 [20] был произведен расчет эффективных и органных доз пациентов, нормированных на единичное значение ПДП_i, т.е. значений КП:

$$КП_i = \frac{E_i}{ПДП_i} \cdot \frac{мкЗв}{сГр \cdot см^2}, \quad (1)$$

Поля облучения для исследования «баллонная пластика пищевода» для детей от 1 до 2 лет

Таблица 2

[Table 2]

Radiation fields for balloon plastic surgery of the esophagus for children from 1 to 2 years]

Поле [Field]	Проекция [Projection]	Размер поля [Field size]	Координаты центра поля [Coordinates]			Орган [Organ]
			X	Y	Z	
Поле 1 [Field 1]	З-П [PA]	8×20	0	5	25	Пищевод [esophagus]
Поле 2 [Field 2]	З-П [PA]	8×20	-0,1	6	26	Пищевод [esophagus]
Поле 3 [Field 3]	З-П [PA]	10×20	0,1	2	31	Пищевод [esophagus]
Поле 4 [Field 4]	З-П [PA]	10×20	2	-7	33	Пищевод [esophagus]
Поле 5 [Field 5]	З-П [PA]	20×20	0,1	-7	25	Пищевод [esophagus]

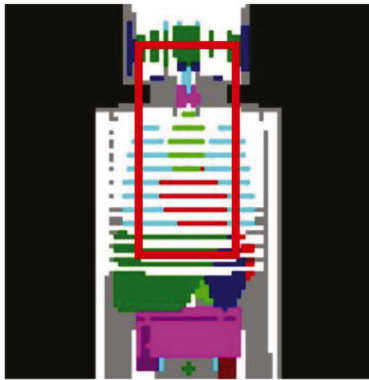


Рис. 1. Поле № 1
[Fig. 1. Field 1]

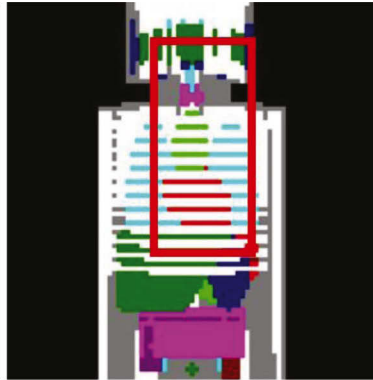


Рис. 2. Поле № 2
[Fig. 2. Field 2]

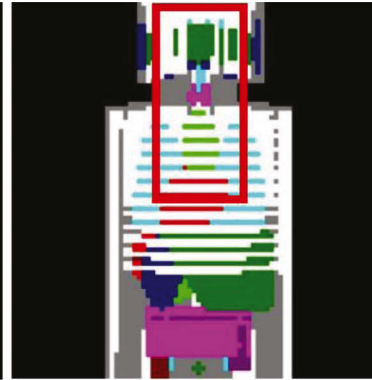


Рис. 3. Поле № 3
[Fig. 3. Field 3]

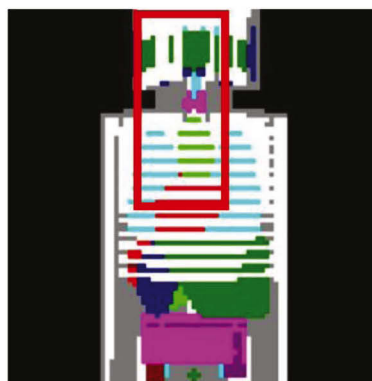


Рис. 4. Поле № 4
[Fig. 4. Field 4]

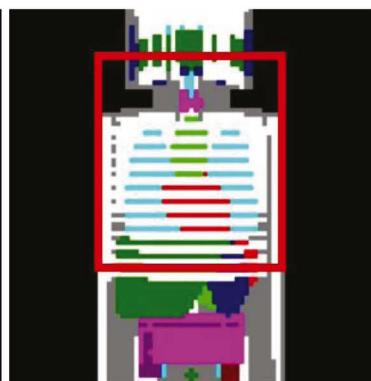


Рис. 5. Поле № 5
[Fig. 5. Field 5]

где:

KP_i – коэффициент перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе для i -го этапа исследования; E_i – эффективная доза за этап рентгеноскопии или рентгенографии, мкЗв; $ПДП_i$ – произведение дозы на площадь для каждого из этапа облучения, сГр $\times$ см².

$$KD_i = \frac{D_i}{ПДП_i} \cdot \frac{\text{мкГр}}{\text{сГр} \cdot \text{см}^2}, \quad (2)$$

где:

KD_i – коэффициент перехода от произведения дозы на площадь к органной дозе для i -го этапа исследования; D_i – органная доза за этап рентгеноскопии или рентгенографии, мкГр; $ПДП_i$ – произведение дозы на площадь для каждого из этапа облучения, сГр $\times$ см².

Определение коэффициента перехода для всего исследования осуществлялось с помощью соотношения:

$$KP_{\text{сум}} = \frac{1}{ПДП_{\text{сум}}} \cdot \sum_i ПДП_i \cdot KP_i, \quad \frac{\text{мкЗв}}{\text{сГр} \cdot \text{см}^2} \quad (3)$$

Таким же образом можно определить коэффициенты перехода от произведения дозы на площадь к органным дозам.

На основании рассчитанных поглощенных доз в радиочувствительных органах и тканях, а также пола и возраста пациента в момент облучения определили пожизненный риск отдаленных стохастических (канцерогенных и наследственных) последствий для здоровья пациента от выбранного исследования с использованием выражения:

$$R(A, G) = \sum_o ПДП \times K \cdot r(A, G, i), \quad (4)$$

где $R(A, G)$ – пожизненный радиационный риск у пациента пола G в возрасте A (лет) от проведения выбранного интервенционного исследования, отн. ед.; $ПДП$ – суммарное произведение дозы на площадь (ПДП) за все этапы и снимки рентгенологического исследования для всех проекций, сГр $\times$ см²; KD_i – коэффициент перехода от произведения дозы на площадь к поглощенной дозе в радиочувствительном органе i , $\frac{\text{мкГр}}{\text{сГр} \cdot \text{см}^2}$; $r(A, G, i)$ – номинальный коэффициент радиационного риска от облучения органа i у лица пола G в возрасте A (лет), МГр⁻¹.

Результаты и обсуждение

Сведения о параметрах проведения баллонной пластики пищевода и значения ПДП для объединенной выборки пациентов представлены в таблице 3 с разделением по выбранным для моделирования полям излучения. Сведения о вкладе каждого из полей излучения в общее ПДП для каждого пациента представлены в таблице 4.

Сведения об эффективных дозах за все исследование и в соответствии с его этапами (полями излучения) представлены в таблице 5 для каждого из пациентов.

На основании значений эффективных доз были определены коэффициенты перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе (табл. 6).

Как видно из таблицы 5, эффективные дозы у детей выбранной возрастной категории за все исследование различаются до порядка величины от 0,3 до 3,9 мЗв. Подобные различия в значениях эффективных доз могут быть связаны со сложностью проведения процедуры,

Таблица 3

Параметры проведения исследований. Данные представлены в формате среднее значение $\pm$ среднеквадратическое отклонение (минимум — максимум)

[Table 3]

Parameters of research. The data is presented in the format average value $\pm$ standard deviation (minimum — maximum)

Показатель [Index]	Поле 1 [Field 1]	Поле 2 [Field 2]	Поле 3 [Field 3]	Поле 4 [Field 4]	Поле 5 [Field 5]	Все исследование [Total]
Напряжение на трубке, кВ [Tube voltage, kV]	78 $\pm$ 2 (77–80)	77 $\pm$ 1 (75–77)	77 $\pm$ 1 (75–77)	77 $\pm$ 0 (77–77)	77 $\pm$ 1 (75–80)	77 $\pm$ 1 (75–77)
Размер поля, см $\times$ см [Field size, cm $\times$ cm]	30 $\times$ 30	20 $\times$ 20/30 $\times$ 30	20 $\times$ 20/30 $\times$ 30	30 $\times$ 30	20 $\times$ 20/30 $\times$ 30	20 $\times$ 20/30 $\times$ 30
Размер поля при моделировании в РСХМС 2.0, см $\times$ см [Field size in РСХМС 2.0, cm $\times$ cm]	8 $\times$ 20	10 $\times$ 20	10 $\times$ 20	8 $\times$ 20	20 $\times$ 20	11,2 $\times$ 20
Расстояние источник – приемник, см [Source to Image Distance, cm]	115 $\pm$ 3,1 (109–118)	115 $\pm$ 2,5 (113–118)	116 $\pm$ 2,3 (113–118)	115 $\pm$ 2,3 (113–118)	115 $\pm$ 3,8 (108–119)	115 $\pm$ 3,4 (108–119)
Общее время рентгеноскопии, с [Total time of X-ray examination, s]	129 $\pm$ 54 (61–202)	71 $\pm$ 32 (41–116)	127 $\pm$ 44 (74–187)	69 $\pm$ 71 (23–151)	181 $\pm$ 243 (3–847)	350 $\pm$ 207 (134–847)
ПДП за просвечивание (непрерывное облучение), сГр $\times$ см ² [DAP for irradiation, cGy $\times$ cm ²]	14,7 $\pm$ 14,8 (0–43)	4,4 $\pm$ 7,6 (0–23)	8,8 $\pm$ 11,2 (0–26)	2,7 $\pm$ 6,2 (0–21)	45,3 $\pm$ 68,7 (1–251)	75,3 $\pm$ 61,3 (26–252)
ПДП за рентгеновские снимки, сГр $\times$ см ² [DAP for x-ray images, cGy $\times$ cm ²]	–	–	–	–	33,8 $\pm$ 102,0 (0–357)	36,1 $\pm$ 102,0 (0–357)
Накопленная доза в коже, мГр [Cumulated dose in the skin, mGy]	–*	–*	–*	–*	–*	8,5 $\pm$ 4,7 (2–18)

* – не оценивали в данном исследовании [not evaluated in this study].

Таблица 4

Произведение дозы на площадь и процентный вклад

[Table 4]

Dose area product and percentage contribution

№ па- циента [Patient]	ПДП за все исследование, сГр $\times$ см ² [Total DAP]	Поле 1 [Field 1]		Поле 2 [Field 2]		Поле 3 [Field 3]		Поле 4 [Field 4]		Поле 5 [Field 5]	
		ПДП, сГр $\times$ см ² [DAP, cGy $\times$ cm ²]	%	ПДП, сГр $\times$ см ² [DAP, cGy $\times$ cm ²]	%	ПДП, сГр $\times$ см ² [DAP, cGy $\times$ cm ²]	%	ПДП, сГр $\times$ см ² [DAP, cGy $\times$ cm ²]	%	ПДП, сГр $\times$ см ² [DAP, cGy $\times$ cm ²]	%
1	33	–	–	5	15%	21	64%	–	–	7	21%
2	68	23	34%	23	34%	–	–	–	–	22	32%
3	264	–	–	–	–	–	–	–	–	264	100%
4	61	14	23%	–	–	17	28%	21	34%	9	15%
5	87	43	49%	14	16%	18	21%	–	–	12	14%
6	83	–	–	–	–	–	–	–	–	84	100%
7	47	–	–	–	–	–	–	–	–	47	100%
8	75	19	25%	–	–	24	32%	6	8%	26	35%
9	383	–	–	–	–	–	–	–	–	383	100%
10	79	26	33%	11	14%	26	33%	5	6%	11	14%
11	32	19	59%	–	–	–	–	–	–	13	41%
Среднее $\pm$ СКО* [average value $\pm$ SD]	110,0 $\pm$ 110,0	24,0 $\pm$ 10,2	37,2 $\pm$ 14,1	13,3 $\pm$ 7,5	19,8 $\pm$ 9,5	21,2 $\pm$ 3,8	35,6 $\pm$ 16,6	10,7 $\pm$ 8,9	16,0 $\pm$ 15,6	79,8 $\pm$ 125,0	52,0 $\pm$ 39,0
Медиана [Median]	75,0	21,0	33,5	12,5	15,5	21,0	32,0	6,0	8,0	22,0	35,0

* СКО – среднеквадратическое отклонение [SD – standard deviation].

Таблица 5

Эффективные дозы и процентный вклад

[Table 5]

Effective doses and percentage contribution]

№ пациен- та [Patient]	ЭД за все исследование, мЗв [Total E, mSv]	Поле 1 [Field 1]		Поле 2 [Field 2]		Поле 3 [Field 3]		Поле 4 [Field 4]		Поле 5 [Field 5]	
		ЭД, мЗв [E, mSv]	%	ЭД, мЗв [E, mSv]	%	ЭД, мЗв [E, mSv]	%	ЭД, мЗв [E, mSv]	%	ЭД, мЗв [E, mSv]	%
1	0,32	–	–	0,06	22%	0,17	53%	–	–	0,08	25%
2	0,69	0,27	39%	0,19	28%	–	–	–	–	0,23	33%
3	2,49	–	–	–	–	–	–	–	–	2,49	100%
4	0,54	0,16	31%	–	–	0,15	29%	0,13	24%	0,08	16%
5	1,09	0,60	55%	0,13	12%	0,19	18%	–	–	0,16	15%
6	1,05	–	–	–	–	–	–	–	–	1,05	100%
7	0,50	–	–	–	–	–	–	–	–	0,50	100%
8	0,86	0,25	29%	–	–	0,25	30%	0,05	6%	0,30	35%
9	3,92	–	–	–	–	–	–	–	–	3,92	100%
10	0,83	0,36	43%	0,12	15%	0,22	26%	0,03	4%	0,10	12%
11	0,35	0,24	69%	–	–	–	–	–	–	0,11	31%
Среднее [average value]	1,2±1,1	0,3±0,2	44,3±15,3	0,1±0,1	19,3± 7,2	0,2± 0,04	31,2±13,1	0,07± 0,1	11,3±11,0	0,8±1,3	51,5±39,1
Медиана [Median]	0,8	0,3	41,0	0,1	18,5	0,2	29,0	0,05	6,0	0,2	33,0

Таблица 6

Коэффициенты перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе

[Table 6]

The conversion coefficients from the dose area product to the effective dose]

Пациент [Patient]	МКРЗ 60 [ICRP 60]		МКРЗ 103 [ICRP 103]	
	ЭД, мЗв [E, mSv]	КП _{сум} (от ПДП к ЭД), мкЗв/(сГр × см²) [The conversion coefficients, μSv/cGy×cm²]	ЭД, мЗв [E, mSv]	КП _{сум} (от ПДП к ЭД), мкЗв/(сГр × см²) [The conversion coefficients, μSv/cGy×cm²]
1	0,32	9,7	0,35	10,7
2	0,69	10,2	0,74	10,9
3	2,49	9,5	2,77	10,4
4	0,54	8,9	0,60	9,9
5	1,09	12,6	1,20	13,8
6	1,05	12,6	1,17	14,0
7	0,50	10,7	0,56	12,0
8	0,86	11,5	0,95	12,7
9	3,92	10,2	4,37	11,4
10	0,83	10,6	0,89	11,3
11	0,35	11,0	0,37	11,8
Среднее [average value]	1,15±1,1	10,7±1,2	1,27±1,2	11,7±1,3

спецификой и тяжестью заболевания, а также с анатомическими особенностями отдельных пациентов. Тем не менее, значения коэффициентов перехода КП_{сум} в выборке пациентов варьируют всего лишь со среднеквадратическим отклонением (СКО) ~10%, несмотря на то, что у половины пациентов при проведении исследования исполь-

зовали лишь 1–2 поля излучения, и только у 1 из пациентов использовали все 5 полей излучения. Это говорит о том, что различия в индивидуальных значениях КП_і в рамках одного вида исследования, проводимого на определенном аппарате, невелики. Действительно, эмпирическое среднее значение среди всех парциальных значений КП_і

оказалось равным: $\overline{KП} = \frac{\sum_{i=1}^{31} KП_i}{31} = 10.3 \pm 2.1$ (СКО), мкЗв/(сГр см²). Это всего лишь на 3% меньше, чем среднее значение в выборке значений КП_{сум} для отдельных пациентов, хотя СКО в этом случае в 2 раза выше. Более того, необходимо отметить, что у всех пациентов в исследовании присутствовала проекция с полем излучения № 5, согласно таблице 4, а у 4 пациентов все исследование состояло из этой единственной проекции. Поэтому можно сделать вывод об особой значимости этой проекции в данном типе исследования и выбрать ее в качестве репрезентативной для исследования в целом. Среднее значение КП₅ для этой проекции для всей выборки пациентов составило 10.6 ± 1.5 мкЗв/(сГр см²), что практически совпадает со средним значением в выборке значений КП_{сум} для отдельных пациентов для всего исследования (10.7 ± 1.2 мкЗв/(сГр см²)).

С учетом этих данных была предложена упрощенная расчетная модель облучения пациентов при выполнении баллонной пластики пищевода детям от 1 до 2 лет, которая описывается 1 полем облучения (табл. 7). Верхняя граница поля облучения – верхняя челюсть; нижняя граница поля облучения – верхний край печени и середина желудка; боковые границы поля облучения – боковые поверхности грудной клетки.

Для упрощенной модели также были рассчитаны значения эффективных доз у всех пациентов. При сравнении значений эффективных доз, полученных при моделировании несколькими полями и одним полем облучения, относительные различия находились в пределах от -16% до 20% (табл. 8). Столь небольшая разница позволяет использовать в данном медицинском учреждении для оценки эффективных доз при проведении баллонной пластики пищевода детям от 1 до 2 лет упрощенную расчетную модель облучения, которая описывается 1 полем облучения и 1 КП = 10,6 мкЗв/(сГр см²). Наличие как детальной, так и упрощенной моделей позволяет использовать дифференцированный подход к оценке доз облучения пациентов.

В связи с отсутствием до настоящего времени отдельного коэффициента перехода для расчета эффективной дозы у детей при проведении баллонной пластики пи-

щевода сотрудники отделения использовали коэффициент перехода, соответствующий рентгенографии органов грудной клетки для данной возрастной группы (МУ 2.6.1.3584-19. Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований). Различия в значениях коэффициентов перехода значительны (5,8 и 10,7 мкЗв/(сГр см²)) и объясняются разницей в значениях напряжения на трубке, расстояниях источник – приемник и размерах поля излучения при проведении этих 2 исследований. Эффективные дозы у детей недооценивались практически в 2 раза.

Таблица 8

Значения эффективных доз, полученных с использованием разных моделей облучения

[Table 8]

Effective doses using different irradiation models

№ пациента [Patient]	ЭД, мЗв [E, mSv]	
	многополевая модель [multi – field model]	однopoлевая модель [single – field model]
1	0,32	0,35
2	0,69	0,72
3	2,49	2,80
4	0,54	0,65
5	1,09	0,92
6	1,05	0,88
7	0,50	0,50
8	0,86	0,80
9	3,92	4,06
10	0,83	0,84
11	0,35	0,34

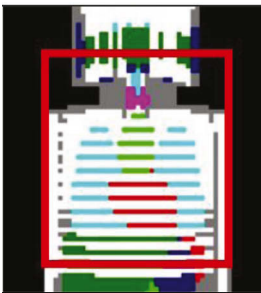
Представленные в таблице 8 коэффициенты перехода могут быть использованы для оценки эффективных доз для детей 1–2 лет, проходящих баллонную пластику пищевода в Санкт-Петербургском государственном педиатрическом медицинском университете.

Таблица 7

Упрощенная модель облучения

[Table 7]

Simplified irradiation model

Поле [Field]	Координаты [Coordinates]			Размер поля [Field size]	Проекция [Projection]	Орган [Organ]	Ориентиры [Landmarks]
	X	Y	Z				
Поле 1 [Field 1]	0	6	25	20×20	З-П [PA]	Пищевод [esophagus]	

В том случае, если протокол проведения баллонной пластики пищевода у отдельных пациентов будет существенно отличаться по структуре исследования и/или параметрам проведения исследования более чем на 10–15%, то для таких пациентов целесообразно разработать другую модель облучения с действующими параметрами по схеме, представленной в данной работе.

Расчетные значения риска для детей в возрасте 0–4 года при проведении интервенционного исследования «Баллонная пластика пищевода» согласно МР 2.6.1.0215-20 (Приложение 3) составили от 2×10^{-5} до 2×10^{-4} для мальчиков и от 7×10^{-5} до 9×10^{-4} для девочек, что соответствует категориям «очень низкого» и «низкого» рисков.

Заключение

Интервенционные исследования являются чрезвычайно интересными и перспективными с точки зрения совершенствования подходов к дозиметрии пациентов.

Результаты верификации метода оценки эффективных доз для интервенционных исследований на примере баллонной пластики пищевода для детей в возрасте от 1 до 2 лет показали, что использование несоответствующих коэффициентов перехода может приводить к недооценке эффективных доз детей в несколько раз.

В настоящей работе представлен детальный подход к оценке уровней облучения и радиационных рисков пациентов при проведении баллонной пластики пищевода. Оценка эффективных доз с использованием многопольной и однопольной модели облучения на примере баллонной пластики пищевода у детей в возрасте от 1 до 2 лет, проводимых на 1 аппарате конкретными врачами, показывает сопоставимые результаты, что в данном случае позволяет использовать упрощенную (однопольную) модель облучения. Выбор между многопольной и однопольной моделями возможен только после анализа полученных данных и разработки многопольной модели.

Наличие моделей облучения для данного исследования может быть использовано в качестве прототипа для получения подобных моделей в других медицинских организациях (отделениях) при выполнении однотипных исследований. Аналогичные исследования должны быть выполнены для разных возрастных групп и видов интервенционных исследований с использованием следующей методики:

1. Разработка моделей облучения пациентов для каждого вида интервенционного исследования на основе данных о структуре исследования, анатомических полях, проекциях облучения, о перемещении рентгеновской трубки во время исследования.
2. Подготовка модели в программном обеспечении (например, РСХМС 2.0.).
3. Сбор необходимых параметров проведения интервенционных исследований для каждого этапа рентгеноскопии и рентгенографии для расчета эффективных и органических доз пациентов.
4. Определение органических и эффективных доз пациентов для каждой анатомической области с помощью специализированного программного обеспечения РСХМС 2.0.
5. Расчет суммарных эффективных и поглощенных доз за все интервенционное исследование на основе произведения дозы на площадь с учетом геометрии облуче-

ния пациента и физико-технических характеристик пучка рентгеновского излучения.

6. Определение пожизненного риска отдаленных стохастических последствий для здоровья пациента от выбранного интервенционного исследования на основании полученных поглощенных доз в радиочувствительных органах и тканях с учетом пола и возраста пациента в момент облучения.

7. Подготовка упрощенных моделей облучения (с сокращенным числом полей), если это возможно.

8. Определение коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе и от произведения дозы на площадь к поглощенной дозе в органах и тканях.

9. Расчет коэффициентов перехода для всего диапазона используемых режимов проведения. В качестве основного параметра, оказывающего максимальное влияние, принимаем анодное напряжение (диапазон 50–120 kV, с шагом 5 kV), толщину фильтра рентгеновского аппарата (Al, Cu), размер поля (10×10 – 40×40 , с шагом 5 см по длине и ширине).

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Капырина Ю.Н. – разработала дизайн исследования, участвовала в проведении сбора данных, разработка моделей, описание результатов, написала черновик рукописи и представила окончательный вариант для публикации в журнале.

Водоватов А.В. – помощь в обработке данных, помощь при проработке и редактировании статьи.

Пузырев В.Г. – осуществлял общее руководство исследованием, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Комиссаров М.И. – сбор и регистрация данных, подготовка проекта статьи.

Алешин И.Ю. – сбор и регистрация данных, подготовка проекта статьи.

Голиков В.Ю. – помощь в обработке данных, помощь при проработке и редактировании статьи.

Орел В.И. – осуществлял общее руководство исследованием, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. ICRP Publication 117. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department // Annals of the ICRP. 2010. Vol. 40, No 6. P. 1-102.
2. Scientific annex A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation The UNSCEAR 2020/2021 Report Volume I to the General Assembly (A/76/46). Официальный сайт НКДАР ООН. URL: https://css.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2020_21_Annex-A.pdf (Дата обращения: 15.06.2023).
3. ISO/IEC 17025:2017(E) General requirements for the competence of testing and calibration laboratories; 2017.
4. EC. Radiation Protection no 180 Medical radiation exposure of the European population, Part 1/2, EU, 2014.
5. Ubeda C., Vano E., Miranda P., Figueroa X. Organ and effective doses detriment to paediatric patients undergoing multiple interventional cardiology procedures // Medical Physics. 2019. Vol. 60. P. 182-187. doi: 10.1016/j.ejmp.2019.03.020.

6. Schegerer A., Loose R., Heuser L.J., Brix G. Diagnostic Reference Levels for Diagnostic and Interventional X-Ray Procedures in Germany: Update and Handling // *Rofo*. 2019. Vol. 191, No 8. P. 739-751. (English, German) doi: 10.1055/a-0824-7603.
7. Barnaoui S., Rehel J.L., Baysson H. et al. Local reference levels and organ doses from pediatric cardiac interventional procedures // *Pediatric Cardiology*. 2014. Vol. 35, No 6. P. 1037-45. doi: 10.1007/s00246-014-0895-5.
8. Walsh M.A., Noga M., Rutledge J. Cumulative radiation exposure in pediatric patients with congenital heart disease – Is detailed examination data critical to dose estimates? // *Pediatric Cardiology*. 2015. Vol. 36, No 2. P. 289-94. doi: 10.1007/s00246-014-0999-y.
9. Karambatsakidou A., Omar A., Fransson A., Poludniowski G. Calculating organ and effective doses in paediatric interventional cardiac radiology based on DICOM structured reports – Is detailed examination data critical to dose estimates? // *Medical Physics*. 2019. No 57. P. 17-24. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.12.008.
10. Lai P., McNeil S.M., Gordon C.L., Connolly B.L. Effective doses in children: association with common complex imaging techniques used during interventional radiology procedures // *American Journal of Roentgenology*. 2014. Vol. 203, No 6. P. 1336-44. doi: 10.2214/AJR.13.11445.
11. Orbach D.B., Stamoulis C., Strauss K.J. et al. Neurointerventions in children: radiation exposure and its import // *American Journal of Neuroradiology*. 2014. Vol. 35, No 4. P. 650-6. doi: 10.3174/ajnr.A3758.
12. Ploussi A., Brountzos E., Rammos S. et al. Radiation Exposure in Pediatric Interventional Procedures // *Cardiovascular and Interventional Radiology*. 2021. Vol. 44, No 6. P. 857-865. doi: 10.1007/s00270-020-02752-7.
13. Rizk C., Fares G., Vanhavere F. et al. Diagnostic Reference Levels, Deterministic and Stochastic Risks in Pediatric Interventional Cardiology Procedures // *Health Physics*. 2020. Vol. 118, No 1. P. 85-95. doi: 10.1097/HP.0000000000001114.
14. Ubeda C., Miranda P., Vano E. et al. Organ and effective doses from paediatric interventional cardiology procedures in Chile // *Medical Physics*. 2017. No 40. P. 95-103. doi: 10.1016/j.ejmp.2017.07.015.
15. Lee C., Yeom Y.S., Shin J. et al. NCIRF: an organ dose calculator for patients undergoing radiography and fluoroscopy // *Biomedical Physics and Engineering Express*. 2023. Vol. 9, No 4. doi: 10.1088/2057-1976/acd2de.
16. Omar A., Bujila R., Fransson A. et al. A framework for organ dose estimation in x-ray angiography and interventional radiology based on dose-related data in DICOM structured reports // *Physics in Medicine & Biology*. 2016. No 61. P. 3063 – 3083.
17. Wildgruber M., Müller-Wille R., Goessmann H. et al. Direct Effective Dose Calculations in Pediatric Fluoroscopy-Guided Abdominal Interventions with Rando-Alderson Phantoms – Optimization of Preset Parameter Settings // *PLoS One*. 2016. Vol. 11, No 8. P. e0161806. doi: 10.1371/journal.pone.0161806.
18. Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Камышанская И.Г. и др. Определение коэффициентов перехода от произведенной 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. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-1-93-100>.
19. 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.
20. Тупыленко А.В., Олдаковский В.И., Лохматов М.М., Будкина Т.Н. Пат. № 2768600 С1 Российская Федерация, МПК А61В 17/94. Способ баллонной дилатации стриктур пищевода у детей с дистрофической формой врожденного буллезного эпидермолиза. опубл. 24.03.2022.
21. Дмитриев Е.Г., Михайлова Н.В. Доброкачественные стриктуры пищевода и выходного отдела желудка: интервенционное ведение (обзор по материалам зарубежной печати) // *Хирургическая практика*. 2011. № 4. С. 28-34.
22. Бойко В.В., Авдосьев Ю.В., Сизый М.Ю. Лечебно-диагностическая баллонная дилатация протяженных послеожоговых стриктур пищевода // *Вестник ХНУ им. В.Н. Каразина. Серия Медицина*. 2005. №10 (658). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lechebno-diagnosticheskaya-ballonnaya-dilatatsiya-prottyazhennyh-posleozhogovyh-strikturn-pischevoda> (Дата обращения: 06.08.2023).
23. Kim K.Y., Tsauo J., Song H.Y. et al. Fluoroscopy-guided balloon dilation in patients with Eustachian tube dysfunction // *European Radiology*. 2018. Vol. 28, No 3. P. 910-919. doi: 10.1007/s00330-017-5040-4.
24. Fan Y., Song H.Y., Kim J.H. et al. Fluoroscopically guided balloon dilation of benign esophageal strictures: incidence of esophageal rupture and its management in 589 patients // *American Journal of Roentgenology*. 2011. Vol. 197, No 6. P. 1481-6. doi: 10.2214/AJR.11.6591.
25. Tapiovaara M., Siiskonen T. PCXMC: A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. 2nd Ed. STUK, Finalnd; 2008.

Поступила: 16.07.2023 г.

Капырина Юлия Николаевна – ассистент кафедры общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. **Адрес для переписки:** 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2; E-mail: kapirina-yuliya@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1018-5200>

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5191-7535>

Пузырев Виктор Геннадьевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0185-3545>

Комиссаров Михаил Игоревич – кандидат медицинских наук, доцент кафедры хирургических болезней детского возраста им. Г.А. Баирова, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению микрохирургического отделения, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4788-7561>

Алешин Иван Юрьевич – кандидат медицинских наук, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению микрохирургического отделения, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1043-8503>

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, Санкт-Петербург, Россия

Орел Василий Иванович – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой социальной педиатрии и организации здравоохранения ФП и ДПО, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6098-3449>

Для цитирования: Капырина Ю.Н., Водоватов А.В., Пузырев В.Г., Комиссаров М.И., Алешин И.Ю., Голиков В.Ю., Орел В.И. Оценка эффективных доз при проведении баллонной пластики пищевода у детей // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 32-43. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-32-43

Assessment of effective doses for fluoroscopy-guided balloon dilatation of benign esophageal strictures in pediatric medicine

Yulia N. Kapryrina¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Victor G. Puzyrev¹, Mikhail I. Komissarov¹, Ivan Yu. Aleshin¹, Vladislav Yu. Golikov², Vasily I. Orel¹

¹ Saint-Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

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

Interventional examinations are associated with high levels of patient exposure per examination, which makes it particularly important to monitor individual patient doses and to assess radiation risks. The aim of this study was the assessment of effective doses for fluoroscopy-guided balloon dilatation of benign esophageal strictures, which was performed on pediatric patients aged 1 to 2 years at the Department of Radiosurgical Methods of Diagnosis and Treatment of St. Petersburg State Pediatric Medical University. Patient exposure patterns were based on our own data collection. The calculation of effective and organ doses of patients normalized by the value of the dose area product measured during the study was carried out using PCXMC 2.0 software. The conversion coefficients from the dose area product to the effective dose were calculated using tissue weighting coefficients from the ICRP Publications 60 and 103 their values were 10.7 and 11.7 $\mu\text{Sv}/\text{cGy cm}^2$, respectively. The results of verification of the method indicated that the use of inappropriate conversion coefficients leads to an almost double underestimation of children's effective doses. Differences in the values of conversion coefficients are significant and are explained by differences in voltage, source to image distance, and irradiation field size. A simplified model of patient exposure was proposed, which is described by a single irradiation field. The assessment of effective doses using multi-field and single-field irradiation model shows comparable results, which allows using the differentiated approach to the assessment of radiation doses of patients.

Key words: effective dose, conversion coefficients, interventional examinations, children, medical exposure.

Yuliya N. Kapryrina

Saint-Petersburg State Pediatric Medical University

Address for correspondence: Litovskaya Str., 2, Saint-Petersburg, Russia, 194100; E-mail: kapirina-yuliya@yandex.ru

Personal contribution of authors

Kapyrina Yu.N. – developed the design of the study, participated in data collection, model development, description of the results, wrote a draft of the manuscript and submitted the final version for publication in the journal.

Vodovotov A.V. – assistance in data processing, assistance in elaboration and editing of the article.

Puzyrev V.G. – carried out the general management of the study, edited the intermediate version of the manuscript.

Komissarov M.I. – data collection and registration, preparation of the draft article.

Aleshin I.Yu. – data collection and registration, preparation of the draft article.

Golikov V.Yu. – assistance in data processing, assistance in elaboration and editing of the article.

Orel V.I. – carried out the general management of the study, edited the intermediate version of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

References

- ICRP Publication 117. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. *Ann ICRP*. 2010 Dec;40(6): 1-102.
- Scientific annex A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation The UNSCEAR 2020/2021 Report Volume I to the General Assembly (A/76/46). Official site UN SCEAR. Available from: https://css.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2020_21_Annex-A.pdf (Accessed: 15.06.2023).
- ISO/IEC 17025:2017(E) General requirements for the competence of testing and calibration laboratories; 2017.
- EC. Radiation Protection no 180 Medical radiation exposure of the European population, Part 1, EU; 2014.
- Ubeda C, Vano E, Miranda P, Figueroa X. Organ and effective doses detriment to paediatric patients undergoing multiple interventional cardiology procedures. *Medical Physics*. 2019;60: 182-187. doi: 10.1016/j.ejmp.2019.03.020.
- Schegeher A, Loose R, Heuser LJ, Brix G. Diagnostic Reference Levels for Diagnostic and Interventional X-Ray Procedures in Germany: Update and Handling. *Rofo*. 2019;191(8): 739-751 (English, German) doi: 10.1055/a-0824-7603.
- Barnaoui S, Rehel JL, Baysson H, Boudjemline Y, Girodon B, Bernier MO, et al. Local reference levels and organ doses from pediatric cardiac interventional procedures. *Pediatric Cardiology*. 2014;35(6): 1037-45. doi: 10.1007/s00246-014-0895-5.
- Walsh MA, Noga M, Rutledge J. Cumulative radiation exposure in pediatric patients with congenital heart disease. *Pediatric Cardiology*. 2015;36(2): 289-94. doi: 10.1007/s00246-014-0999-y.
- Karambatsakidou A, Omar A, Fransson A, Poludniowski G. Calculating organ and effective doses in paediatric interventional cardiac radiology based on DICOM structured reports – Is detailed examination data critical to dose estimates? *Medical Physics*. 2019;57: 17-24. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.12.008.
- Lai P, McNeil SM, Gordon CL, Connolly BL. Effective doses in children: association with common complex imaging techniques used during interventional radiology procedures. *American Journal of Roentgenology*. 2014;203(6): 1336-44. doi: 10.2214/AJR.13.11445.
- Orbach DB, Stamoulis C, Strauss KJ, Manchester J, Smith ER, Scott RM, Lin N. Neurointerventions in children: radiation exposure and its impact. *American Journal of Neuroradiology*. 2014;35(4): 650-6. doi: 10.3174/ajnr.A3758.
- Ploussi A, Broutzos E, Rammos S, Apostolopoulou S, Efstathiopoulos EP. Radiation Exposure in Pediatric Interventional Procedures. *Cardiovascular and Interventional Radiology*. 2021;44(6): 857-865. doi: 10.1007/s00270-020-02752-7.
- Rizk C, Fares G, Vanhavere F, Saliba Z, Farah J. Diagnostic Reference Levels, Deterministic and Stochastic Risks in Pediatric Interventional Cardiology Procedures. *Health Physics*. 2020;118(1): 85-95. doi: 10.1097/HP.0000000000001114.
- Ubeda C, Miranda P, Vano E, Nocetti D, Manterola C. Organ and effective doses from paediatric interventional cardiology procedures in Chile. *Medical Physics*. 2017;40: 95-103. doi: 10.1016/j.ejmp.2017.07.015.
- Lee C, Yeom YS, Shin J, Streitmatter SW, Kitahara CM. NCIRF: an organ dose calculator for patients undergoing radiography and fluoroscopy. *Biomedical Physics and Engineering Express*. 2023;9(4). doi: 10.1088/2057-1976/acd2de.
- Omar A, Bujila R, Fransson A, Andreo P, Poludniowski GG. A framework for organ dose estimation in x-ray angiography and interventional radiology based on dose-related data in DICOM structured reports. *Physics in Medicine & Biology*. 2016;61: 3063 – 3083.
- Wildgruber M, Müller-Wille R, Goessmann H, Uller W, Wohlgemuth WA. Direct Effective Dose Calculations in Pediatric Fluoroscopy-Guided Abdominal Interventions with Rando-Alderson Phantoms – Optimization of Preset Parameter Settings. *PLoS One*. 2016;11(8): e0161806. doi: 10.1371/journal.pone.0161806.
- Vodovotov AV, Golikov VYu, Kamyschanskaya IG, Zinkevich KV, Bernhardsson C. 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).
- Vodovotov A, Golikov V, Kamyschanskaya I, Cheremysyn V, Zinkevich K, Bernhardsson C. 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.
- Tupulyenko AV, Oldakovskiy VI, Lokmatov MM, Budkina TN. Pat. № 2768600 C1 Russian Federation, МПК А61В 17/94. Method for balloon dilatation of esophageal strictures in children with dystrophic form of congenital epidermolysis bullosa. Published 24.03.2022. (In Russian).
- Dmitriev EG, Mikhailova NV. Benign strictures of the esophagus and gastric outlet: interventional management (review based on foreign press materials). *Khirurgicheskaya praktika = Surgical practice*. 2011;4: 28-34. (In Russian).
- Boyko VV, Avdosiev YuV, Sizyy MYu. Therapeutic and diagnostic balloon dilatation of extended post-burn strictures of the esophagus. *Vestnik KhNU im. V.N. Karazina. Seriya Meditsina = Vestnik KhNU im. V.N. Karazin. Medicine Series*. 2005;10(658). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/lechebno-diagnosticheskaya-ballonnaya-dilatatsiya-protyazhennyh-posleozhogovyh-striktur-pischevoda> (Accessed: 06.08.2023). (In Russian).
- Kim KY, Tsao J, Song HY, Park HJ, Kang WS, Park JH, et al. Fluoroscopy-guided balloon dilation in patients with Eustachian tube dysfunction. *European Radiology*. 2018;28(3): 910-919. doi: 10.1007/s00330-017-5040-4.
- Fan Y, Song HY, Kim JH, Park JH, Ponnuswamy I, Jung HY, et al. Fluoroscopically guided balloon dilation of benign esophageal strictures: incidence of esophageal rupture and its management in 589 patients. *American Journal of Roentgenology*. 2011;197(6): 1481-6. doi: 10.2214/AJR.11.6591.
- Tapiovaara M, Siiskonen T. PCXMC: A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. 2nd Ed. STUK, Finalnd; 2008.

Received: July 16, 2023

For correspondence: Yuliya N. Kapryina – the Assistant of the Department of General Hygiene, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University (Litovskaya Str., 2, Saint-Petersburg, Russia, 194100; E-mail: kapirina-yuliya@yandex.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1018-5200>

Aleksandr V. Vodovatov – PhD, 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 Well-Being, docent of the Department of General Hygiene, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5191-7535>

Viktor G. Puzyrev – MD, Ph.D., Assistant Professor, the Head of the Department of General Hygiene, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0185-3545>

Mikhail I. Komissarov – MD, Ph.D., Assistant Professor, Department of Surgical Diseases of Childhood named after G.A. Bairov, doctor for X-ray endovascular diagnostics and treatment of the microsurgical department, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4788-7561>

Ivan Yu. Aleshin – MD, Ph.D., doctor for X-ray endovascular diagnostics and treatment of the microsurgical department, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1043-8503>

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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Vasily I. Orel – MD, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head. Department of Social Pediatrics and Public Health Organization and AF and DPO, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6098-3449>

For citation: Kapryina Yu.N., Vodovatov A.V., Puzyrev V.G., Komissarov M.I., Aleshin I.Yu., Golikov V.Yu., Orel V.I. Assessment of effective doses for fluoroscopy-guided balloon dilatation of benign esophageal strictures in pediatric medicine. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 32-43. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-32-43

Накопление ^{137}Cs экологическими группами прибрежно-водной растительности пойменных лугов реки Сож

Н.М. Дайнеко, С.Ф. Тимофеев

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины Министерства образования Республики Беларусь, Гомель, Республика Беларусь

Цель исследования — выявить различия в содержании ^{137}Cs в фитомассе прибрежно-водной растительности Ветковского и Чечерского районов Гомельской области за период 2012–2022 гг. Описание и выделение экологических групп прибрежно-водной растительности и отбор почвенно-растительных проб для определения содержания радиоцезия в вегетационные периоды 2012 г. и 2022 г. проводили по общепринятым методикам. Установлено, что содержание ^{137}Cs в пробах воды объектов Ветковского района не превышало нормативного значения для питьевой воды (10 Бк/кг). Средняя удельная активность радиоцезия в почвогрунте по изучаемым объектам составила в 2012 и в 2022 гг. 807 ± 125 и 586 ± 84 Бк/кг соответственно; а для почвы — 549 ± 85 и 395 ± 46 Бк/кг соответственно. С течением времени произошло снижение количества радиоцезия в почвогрунте и в почве в 1,3–1,4 раза. Среднее содержание изотопа в растениях объектов в 2012, 2022 гг. было 93–917 и 59–578 Бк/кг соответственно. Амплитуда варьирования средних значений КН в системе почва — растение составляли в 2012 и 2022 гг. 1,03 и 0,11 Бк/кг:Бк/кг соответственно, в системе почвогрунт — растение — 3,08 и 0,01 Бк/кг:Бк/кг соответственно. Удельная активность ^{137}Cs в воде объектов Чечерского района не превышала 3 Бк/л. Среднее содержание изотопа цезия-137 в почвогрунте составляло в 2012 г. и 2022 г. 316 и 231 Бк/кг соответственно. Эти же параметры для почвы были в пределах 471 и 340 Бк/кг соответственно. Среднее содержание ^{137}Cs в фитомассе в 2012 г. варьировало в пределах от 149 до 483 Бк/кг. Через 10 лет количество радионуклида составляло 115–288 Бк/кг. Средние значения КН в звене почва — растение в 2012 г. 1,44 и в 2022 г. 1,01 Бк/кг:Бк/кг, а в системе почвогрунт — растение — 1,70 и 1,10 Бк/кг:Бк/кг соответственно. В результате проведенных исследований не выявлены одинаковые доминирующие группы прибрежно-водных растений по накоплению радиоцезия по объектам Ветковского и Чечерского районов.

Ключевые слова: ^{137}Cs , радиоактивное загрязнение, удельная активность радионуклида, радиологический анализ, прибрежно-водные растения, экологические группы.

Введение

Одним из негативных последствий катастрофы на ЧАЭС продолжает оставаться радиоактивное загрязнение пойменных лугов. Величина накопления радионуклидов одними и теми же видами луговых растений в зависимости от почвенно-климатических условий может отличаться в 3–8 раз, а в отдельных случаях — до 30 раз [1, 2, 3].

Пойменные ландшафты представлены значительным количеством составляющих элементов, в том числе различными водоемами. Это могут быть старицы, озера, ручьи. Они могут использоваться для самых различных нужд живыми организмами. Все это подразумевает существование экосистем. В зависимости от типа питания формируются различные экологические условия [4].

Видовой состав прибрежно-водной растительности позволяет достаточно точно оценить экологическое состояние экосистемы. В различных физико-географических условиях одни и те же виды могут встречаться в во-

доемах различного трофического уровня и могут иметь разное индикаторное значение. Поэтому при разовых наблюдениях по присутствию или отсутствию какого-либо вида нельзя давать оценку качества среды [5–7].

Одним из экологических факторов является радиоактивное загрязнение биотопов. При поступлении радионуклидов в воду открытых водоемов сначала происходит разбавление исходного вещества, затем поглощение их почвогрунтом или донными отложениями. В результате бенталь становится хранилищем долгоживущих элементов.

Обычно для воды характерно уменьшение содержания ^{137}Cs со временем. Для донных отложений и водной растительности возможна концентрация радионуклида. Основное влияние на водную экосистему могут оказывать донные отложения. Содержание изотопов будет больше в органических отложениях, чем в песках [8].

Кроме того, на загрязнение донных отложений могут оказать влияние особенности глобальных выпадений

Дайнеко Николай Михайлович

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

Адрес для переписки: 246028, Республика Беларусь, Гомель, ул. Советская, д. 104; E-mail Dajneko@gsu.by

радиоцезия в период испытаний ядерного оружия и катастрофы на Чернобыльской АЭС [9]. Степень накопления радиоактивных элементов донными отложениями зависит от физико-химического состава и дисперсности грунта [10].

Накопление радионуклидов в донных отложениях имеет высокую положительную статистически достоверную корреляцию с содержанием ^{137}Cs в почве водосбора [11].

В отличие от воды и донных отложений рек, где содержание радионуклидов подвержено временной динамике, накопление радиоактивных изотопов в растениях служит более надежным показателем радиоактивного загрязнения аквальных и субаквальных экосистем [12].

Одними из наиболее загрязненных радиоактивными веществами в результате катастрофы на ЧАЭС являются территории пойменных лугов Ветковского и Чечерского районов Гомельской области, граничащих с территорией Российской Федерации.

Таким образом, для оценки радиоэкологической ситуации на пойменных водоемах необходимо изучение накопления радионуклидов в почве, донных отложениях и прибрежно-водной растительности.

Цель исследования – выявить различия в содержании ^{137}Cs в фитомассе прибрежно-водной растительности Ветковского и Чечерского районов Гомельской области за период 2012–2022 гг.

Задачи исследования

1. Выявить доминирующие экологические ассоциации прибрежно-водных растений на объектах поймы р. Сож.
2. Выявить накопление радиоцезия в субстратах прибрежно-водных растений.
3. Определить содержание ^{137}Cs в фитомассе прибрежно-водной растительности в различных экологических группах.

Материалы и методы

Объектом исследований была прибрежно-водная растительность Ветковского и Чечерского районов, приграничных с территорией Брянской области (Российская Федерация). Расположение объектов исследований приведено далее.

Ветковский район. Объект № 1. Ручей Безымянный, правый приток р. Сож, вблизи населенного пункта (НП) Новоселки, в 0,5 км от р. Сож. Координаты: N 52°36'323", E 31°5'034". Объект № 2. Левобережная пойма р. Сож, перед мостом, вблизи города Ветка. Координаты: N 52°34'045", E 31°9'652". Объект № 3. Окраина НП Старое Село, берег озера Чечиль. Координаты: N 52°31'392", E 31°8'492".

Чечерский район. Объект № 4. Обустроенное место отдыха жителей городского поселка Чечерск, восточный берег озера Вир. Координаты: N 52°57'30.7", E 30°56'88.3". Объект № 5. Левобережная пойма р. Покоть перед мостом в 1 км юго-восточнее НП Покоть Чечерского района. Координаты: N 52°52'16.4", E 31°07'27.9". Объект № 6. Левобережная пойма р. Сож против НП Вознесенский Чечерского района Гомельской области. Координаты: N 52°53'35.54", E 30°58'14.1". Объект № 7. Правобережная пойма перед мостом р. Сож напротив НП Вознесенский. Координаты: N 52°53'37.5", E 30°57'51.4".

Описание растительности и отбор почвенно-растительных проб для определения содержания ^{137}Cs в вегетационные периоды 2012 г. и 2022 г. проводили по общепринятым методикам [13–16].

Выделение экологических групп прибрежно-водной растительности осуществляли согласно [17].

При определении видового состава лекарственных растений использовали определитель растений [18].

Определение содержания ^{137}Cs в почвенных пробах и растительных образцах производили на гамма-спектрометрическом комплексе Tennelec по МВИ. МН 3421-2010 «Методика выполнения измерений объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами» [«Technique for measuring the volumetric and specific activity of gamma-emitting radionuclides on gamma spectrometers with semiconductor detectors» (In Russ.)].

Оценку радиоактивного загрязнения растений и возможности их безопасного использования выявляли путем сопоставления полученных результатов с нормативным показателем Республиканского допустимого уровня содержания ^{137}Cs в лекарственно-техническом сырье (РДУ/ЛТС-2004) [Republican permissible level of cesium-137 content in medicinal and technical raw materials (In Russ.)], равным 370 Бк/кг.

Результаты и обсуждение

Результаты радиологического анализа проб воды, почвогрунта и почвы объектов Ветковского района представлены в таблице 1. Содержание радиоцезия в воде в годы исследований не превышало нормативного значения для питьевой воды (10 Бк/кг).

Удельная активность радиоцезия в почве составляла от 85 до 1251 Бк/кг. Максимальное количество радиоцезия в почве было выявлено на объекте 2, а минимальное – на объекте 1. Для почвогрунта эти значения составили от 180 до 1615 Бк/кг. Наибольшая активность радионуклида в 2012 г. была обнаружена в почвогрунте объекта 1, а минимальная – на объекте 2. К 2022 г. эта тенденция сохранилась. Установлено что с течением времени произошло снижение количества радиоцезия и в почве, и в почвогрунте в 1,3–1,4 раза.

Важнейшим параметром оценки радиоэкологической ситуации является плотность радиоактивного загрязнения. Плотность радиоактивного загрязнения на объектах в 2012 г. составляла от 111 кБк/м² (3 Ки/км²) до 740 кБк/м² (20 Ки/км²), в 2022 г. эти параметры уменьшились от 37 кБк/м² (1 Ки/км²) до 222 кБк/м² (6 Ки/км²) соответственно. Такие явления могут быть связаны не только с процессом радиоактивного распада, но и с затоплением территории и смывом радионуклидов в депрессии рельефа, а также в воду реки.

В наших исследованиях не выявлена взаимосвязь между количеством радионуклида в почве и его содержанием в почвогрунте. Здесь существенными факторами могут быть особенности рельефа, а также количество физической глины в почве и илистых фракций в почвогрунте, а также другие физико-химические свойства субстратов.

В изучаемых объектах на территории Ветковского района установлено 6 групп прибрежно-водной растительности. В состав гидрофитов, плейстогидрофитов укореняющихся входило по 1 виду, аэрогидрофитов

Содержание радиоцезия в пробах воды, почвогрунта и почвы на объектах Ветковского района

Таблица 1

[Table 1]

The content of radiocesium in samples of water, soil and soil at the objects of the Vetka district

Номер объекта [Object number]	Объемная активность ^{137}Cs в воде, Бк/л [Volumetric activity of ^{137}Cs in water, Bq/l]		Удельная активность ^{137}Cs в почвогрунте, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in bottom sediments, Bq/kg]		Удельная активность ^{137}Cs в почве, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in soil, Bq/kg]	
	2012 г.	2022 г.	2012 г.	2022 г.	2012 г.	2022 г.
1	<3,0	<3,0	1615±247	1180±177	111±19	85±7
2	<3,0	<3,0	251±41	180±27	1251±191	900±108
3	<3,0	<3,0	556±87	398±48	286±44	200±22

высокорослых и гигрогелофитов среднерослых – по 2 вида. По 5–6 видов растений выделено в группах аэрогидрофитов среднерослых и эуигрофитов среднерослых. На объектах 1 и 2 выделено по 5 видов растений, объекте 3 – 7 видов.

Содержание радиоцезия в прибрежно-водной растительности объектов Ветковского района варьировало в широких пределах. Пределы варьирования данного параметра для объекта 1 в условиях 2012 г. составляли от 11 до 179 Бк/кг, в 2022 г., то есть через 10 лет, – от 10 до 110 Бк/кг; для объекта 2 – 133–1928 и 78–1420 Бк/кг соответственно и для объекта 3 – 13–334 и 13–260 Бк/кг.

Таким образом, с течением времени, то есть через 10 лет, для всех видов растительности произошло заметное снижение содержания радионуклида.

Ввиду многообразия условий по специфике объектов целесообразно рассмотреть радиоэкологическую ситуацию на каждом объекте отдельно.

Для растительности объекта 1 выявлено снижение содержания радиоцезия в биомассе 4 видов из 5 (табл. 2).

Уменьшение содержания радионуклида составляло до 58–68% от исходного количества. Не выявлено снижения содержания радионуклида лишь для 1 вида – камыша

озерного. Установлено, что среднее содержание радиоцезия в прибрежно-водной растительности объекта 1 составляло в 2012 г. 93 Бк/кг, а в 2022 г. – 59 Бк/кг.

Одним из параметров оценки радиоэкологической ситуации является коэффициент накопления – КН. Исследуемые виды растений произрастали на 2 различных субстратах – почве и почвогрунте. Средние значения КН для системы почва – растение составляли для 2012 г. и 2022 г. 1,03 и 0,83 Бк/кг:Бк/кг соответственно. Для системы почвогрунт – растение соответственно 0,01 и 0,01 Бк/кг:Бк/кг. Это означает большие переходы радионуклида из почвы в растения.

Содержание цезия 137 в растительности объекта 2 было значительно выше, чем на других объектах (табл. 3). Так, среднее содержание радионуклида в растительности в условиях 2012 г. составляло 917 Бк/кг, а в 2022 г. – 578 Бк/кг. Снижение содержания радиоцезия составляло в среднем от первоначального определения от 53 до 73%. Кроме того, максимальная концентрация радиоцезия выявлена для группы аэрогидрофитов среднерослых и была в пределах 1384–1928 Бк/кг. Минимальное значение параметра зафиксировано для группы гигрогелофитов среднерослых – 133 Бк/кг.

Аккумуляция ^{137}Cs прибрежно-водной растительностью объекта 1 пойменного луга р. Сож на территории Ветковского района

Таблица 2

[Table 2]

Accumulation of ^{137}Cs by coastal aquatic vegetation of object 1 of the floodplain meadow of the river Sozh on the territory of the Vetka district

Вид растения [plant type]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg: Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Плейстогидрофиты укореняющиеся [Pleistohydrophytes rooting]				
Горец земноводный [<i>Persicaria amphibia</i>]	179±19	110±14	1,61	1,30
Аэрогидрофиты высокорослые [Aerohydrophytes tall]				
Камыш озерный [<i>Schoenoplectus lacustris</i>]	11±3	10±1	0,01	0,01
Эуигрофиты среднерослые [Euhydrophytes medium tall]				
Мята полевая [<i>Mentha arvensis</i>]	61±15	42±3	0,55	0,49
Поручейник широколистный [<i>Sium latifolium</i>]	94±20	55±10	0,85	0,65
Черда трехраздельная [<i>Bidens tripartita</i>]	122±29	76±6	1,10	0,89

Средние значения КН для системы почва – растение составляли для 2012 г. и 2022 г. 0,90 и 0,68 Бк/кг:Бк/кг соответственно; для системы почвогрунт – растение – 3,08 и 3,02 Бк/кг:Бк/кг соответственно. Таким образом, на объекте 2 переходы радиоцезия в растения значительно выше на почвогрунте, чем на почве.

Для прибрежно-водной растительности объекта 3 амплитуда варьирования содержания радионуклида была в пределах в 2012 г. 13 – 334 Бк/кг, а в 2022 г. – 13–260 Бк/кг (табл. 4). Максимальной аккумуляцией элемента характеризовался один из видов группы аэрогидрофитов среднерослых, а именно ситняг болотный.

Таблица 3

Аккумуляция ^{137}Cs прибрежно-водной растительностью объекта 2 пойменного луга р. Сож на территории Ветковского района

[Table 3]

Accumulation of ^{137}Cs by coastal-aquatic vegetation of object 2 of the floodplain meadow of the Sozh river on the territory of the Vetkovsky district]

Вид растения [plant type]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg: Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Аэрогидрофиты высокорослые [Aerohydrophytes are tall]				
Рогоз широколистный [<i>Typha latifolia</i>]	259±47	152±14	1,03	0,84
Аэрогидрофиты среднерослые [Aerohydrophytes are medium – sized]				
Хвощ полевой [<i>Equisetum arvense</i>]	1384±208	780±205	1,10	0,86
Сабельник болотный [<i>Comarum palustre</i>]	1928±289	1420±255	7,70	7,88
Эуигрофиты среднерослые [Eugigrophytes are medium – sized]				
Вербейник обыкновенный [<i>Lysimachia vulgaris</i>]	870±136	460±99	0,70	0,51
Гигрогелофиты среднерослые [Hyrogelophytes are medium – sized]				
Аир обыкновенный [<i>Acorus calamus</i>]	133±29	78±12	0,53	0,43

Таблица 4

Аккумуляция ^{137}Cs прибрежно-водной растительностью объекта 3 пойменного луга р. Сож на территории Ветковского района

[Table 4]

Accumulation of ^{137}Cs by coastal-aquatic vegetation of object 3 of the floodplain meadow of the Sozh river on the territory of the Vetkovsky district]

Вид растения [plant type]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg: Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Гидрофиты [Hydrophytes]				
Роголистник погруженный [<i>Ceratophyllum demersum</i>]	260±49	50±27	86,70	16,70
Аэрогидрофиты среднерослые [Aerohydrophytes are medium – sized]				
Частуха подорожниковая [<i>Alisma plantago-aquatica</i>]	15±4	15±1	0,03	0,04
Осока острая [<i>Carex acuta</i>]	48±12	34±3	0,09	0,08
Ситняг болотный [<i>Eleocharis palustris</i>]	334±60	260±47	0,60	0,65
Эуигрофиты среднерослые [Eugigrophytes are medium – sized]				
Вербейник обыкновенный [<i>Lysimachia vulgaris</i>]	13±4	13±1	0,05	0,06
Поручейник широколистный [<i>Sium latifolium</i>]	56±13	34±2	0,20	0,17
Гигрогелофиты среднерослые [Hyrogelophytes are medium – sized]				
Полевица побегообразующая [<i>Agrostis stolonifera</i>]	22±6	14±1	0,07	0,07

Среднее содержание радиоцезия в растительности объекта 3 для условий 2012 г. составляло 107 Бк/кг, а для 2022 г. – 60 Бк/кг.

В группе гидрофитов по количеству радионуклида выделяется роголистник погруженный. Этот вид характеризовался максимальными значениями КН. Они составили 86,7 в 2012 г. и 16,7 Бк/кг:Бк/кг в 2022 г. Это возможно, связано с особенностями воды как среды обитания.

Средние значения КН объекта 3 для системы почва – растение составляли для 2012 г. и 2022. г 0,11 и 0,10 Бк/кг: Бк/кг соответственно; для системы почвогрунт – растение – 0,24 и 0,26 Бк/кг:Бк/кг соответственно. Таким образом, на объекте 3 также переходы радиоцезия в растения значительно выше на почвогрунте, чем на почве.

Результаты анализа показали различия по накоплению изотопа в растительности изучаемых объектов. Так, среднее содержание радиоцезия в течение 2012–2022 гг. на объекте 1 составляло 93–59 Бк/кг, на объекте 2 – 917–578 Бк/кг и на объекте 3 – 107–60 Бк/кг.

Амплитуда варьирования средних значений КН по 3 объектам в системе почва – растение составляли в 2012 и 2022 гг. 1,03 и 0,11 Бк/кг:Бк/кг соответственно; в системе почвогрунт – растение – 3,08 и 0,01 Бк/кг:Бк/кг.

На основе изложенной информации можно произвести ранжирование групп прибрежно-водной растительности объектов Ветковского района в порядке возрастания содержания радиоцезия следующим образом.

Объект 1. Аэрогидрофиты высокорослые > Эугигрофиты среднерослые > Плейстогидрофиты укореняющиеся. Объект 2. Гигрогелофиты среднерослые > Аэрогидрофиты высокорослые > Эугигрофиты среднерослые > Аэрогидрофиты среднерослые. Объект 3. Гигрогелофиты среднерослые > Эугигрофиты среднерослые > Аэрогидрофиты среднерослые > Гидрофиты.

Изучение прибрежно-водной растительности Чечерского района осуществляли на 4 объектах.

Результаты радиологического анализа проб воды, почвогрунта и почвы представлены в таблице 5. Содержание радиоцезия в воде в 2012 г. и в 2022 г. было меньше 3 Бк/л при нормативном значении 10 Бк/л.

Содержание ^{137}Cs в почве экосистем в 2012 г. составляло от 227 до 778 Бк/кг или в среднем 471 Бк/кг. Для почвы 2022 г. эти параметры составили 180–520 и 340 Бк/кг соответственно. Таким образом, среднее содержание изотопа через 10 лет составляло около 63% от первоначального количества.

Содержание радионуклида в почвогрунте в 2012 г. составляло от 56 до 580 Бк/кг при среднем значении 316 Бк/кг.

Для 2022 г. эти параметры составили 49, 410 и 231 Бк/кг соответственно.

Минимальная активность радиоцезия в почвогрунте зафиксирована для объекта 7, хотя загрязнение почвы вокруг экосистемы максимальное.

В изученных объектах прибрежно-водной растительности выделено 8 экологических групп. Эти группы более многочисленны по количеству составляющих их видов по сравнению с Ветковским районом. В немалой степени это связано с более плодородным почвенным покровом. По нашим данным, на объекте 4 зафиксировано 11 видов, относящихся к 5 группам; для объекта 5 – 10 видов и 5 групп соответственно, для объекта 6 – 13 видов и 6 групп. Наименьшее разнообразие выявлено для объекта 7 – 7 видов и 4 группы.

Наиболее представительной группой видов среди изучаемых объектов являются эугигрофиты высокорослые, представленные 5 видами на объекте 4, и гигрогелофиты, включающие 6 видов на объекте 6. Третьей наиболее распространенной группой являются аэрогидрофиты среднерослые, представленные 4 видами на объекте 7. Исследованиями не выявлено одной доминирующей группы на всех 4 объектах.

Как уже отмечалось ранее, на объекте 4 выделено 11 видов в 5 группах (табл. 6).

Исследованиями установлено, что содержание ^{137}Cs в наземной фитомассе прибрежно-водной растительности объекта 4 составляло в условиях 2012 г. от 49 до 2811 Бк/кг. Среднее значение содержания радионуклида по группам составляло 103, 49, 199, 341 и 1723 Бк/кг соответственно. Максимальное количество элемента зафиксировано для гигрофитов среднерослых. Среднее количество радиоцезия в растительности объекта 4 составило 483 Бк/кг. В условиях 2022 г. удельная активность изотопа снизилась до 45–62% от первоначальных значений параметра.

На объекте 4 были изучены 3 субстрата – вода, почва и почвогрунт. Средние значения КН для системы вода – растение по годам составляли 34,3 и 15,7 Бк/кг:Бк/кг соответственно; в системах почва – растение и почвогрунт – растение – 1,41–1,04, и 0,46–0,21 Бк/кг:Бк/кг соответственно. Отсюда следует, что большие переходы выявлены для системы почва – растение.

Видовое разнообразие объекта 5 представлено 10 видами, входящими в состав 5 групп. Радиоактивное загрязнение растительности объекта 5 существенно меньше значений объекта 4 (табл. 7).

Наиболее загрязненной изотопом группой видов являются эугигрофиты среднерослые. Амплитуда варьирования параметра составляла в 2012 г. от 20 до 2883 Бк/кг. Среднее зна-

Таблица 5

Содержание радиоцезия в пробах воды, почвогрунта и почвы на объектах Чечерского района

[Table 5]

Radiocesium content in water, soil and soil samples at the facilities of the Chechersk district]

Номер объекта [Object number]	Объемная активность ^{137}Cs в воде, Бк/л [Volume activity of ^{137}Cs in water, Bq/l]		Удельная активность ^{137}Cs в почвогрунте, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in bottom sediments, Bq/kg]		Удельная активность ^{137}Cs в почве, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in soil, Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022	2012	2022
4	<3,0	<3,0	580±90	410±52	533±81	390±54
5	<3,0	<3,0	337±52	256±41	227±35	180±21
6	<3,0	<3,0	290±43	210±22	346±51	270±34
7	<3,0	<3,0	56±9	49±6	778±118	520±78

Таблица 6
Аккумуляция ^{137}Cs прибрежно-водными растениями пойменного луга р. Сож Чечерского района, объект 4
[Table 6
Accumulation of ^{137}Cs by riparian-aquatic plants of the floodplain meadow of R. Sozh Chechersky district, object 4]

Вид растения [Type of plant]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg:Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Гидрофиты [Hydrophytes]				
Телорез обыкновенный [<i>Stratiotes aloides</i>]	103±14	47±15	34,3	15,70
Плейстогидрофиты укореняющиеся [Pleistohydrophytes rooting]				
Кубышка желтая [<i>Nuphar lutea</i>]	49±14	29±8	0,08	0,07
Аэрогидрофиты среднерослые [Aerohydrophytes are medium – sized]				
Осока острая [<i>Carex acuta</i>]	225±65	140±27	0,39	0,34
Стрелолист обыкновенный [<i>Sagittaria sagittifolia</i>]	172±22	95±11	0,30	0,23
Эуигрофиты высокорослые [Eugygrophytes are tall]				
Вероника длиннолистная [<i>Veronica longifolia</i>]	228±31	140±14	0,43	0,36
Щавель водный [<i>Rumex aquaticus</i>]	255±38	150±18	0,48	0,38
Поручейник широколистный [<i>Broad – leaved porucheynik</i>]	798±167	460±64	1,50	1, 18
Птармика обыкновенная [<i>Achillea ptarmica</i>]	125±17	72±6	0,23	0,18
Крапива двудомная [<i>Urtica dioica</i>]	298±53	165±20	0,56	0,42
Гигрогелофиты среднерослые [Hygrogelophytes are medium – sized]				
Аир обыкновенный [<i>Acorus calamus</i>]	2811±421	1500±270	5,27	3,84
Чистец болотный [<i>Stachys palustris</i>]	635±99	368±67	1,09	0,94

Таблица 7
Аккумуляция ^{137}Cs прибрежно-водными растениями пойменного луга р. Сож Чечерского района, объект 5
[Table 7
Accumulation of ^{137}Cs by riparian-aquatic plants of the floodplain meadow of the .Sozh river, Chechersky district, object 5]

Вид растения [Type of plant]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg:Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Плейстогидрофиты укореняющиеся [Pleistohydrophytes rooting]				
Кубышка желтая [<i>Nuphar lutea</i>]	75±5	40±13	0,22	0,16
Аэрогидрофиты высокорослые [Aerohydrophytes are tall]				
Тростник обыкновенный [<i>Phragmites australis</i>]	20±6	15±1	0,06	0,06
Рогоз широколистный [<i>Typha latifolia</i>]	47±15	30±3	0,14	0,11
Аэрогидрофиты среднерослые [Aerohydrophytes are medium – sized]				
Осока острая [<i>Carex acuta</i>]	70±11	40±6	0,21	0,16
Осока пузырчатая [<i>Carex vesicaria</i>]	228±31	160±24	0,68	0,62
Эуигрофиты среднерослые [Eugigrophytes are medium – sized]				
Вербейник обыкновенный [<i>Lysimachia vulgaris</i>]	27±8	22±2	0,12	0,12
Щавель густой [<i>Rumex confertus</i>]	1441±182	750±112	4,28	2,93
Крапива двудомная [<i>Urtica dioica</i>]	300±51	170±18	1,32	0,94

Окончание таблицы 7

Вид растения [Type of plant]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg:Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Ситник развесистый [<i>Juncus effusus</i>]	2883±375	1500±27	12,7	8,3
Гигрогелофиты среднерослые [Hydrogeloephytes are medium – sized]				
Таволга вязолистная [<i>Filipendula ulmaria</i>]	137±22	79±9	0,60	0,44

чение содержания радиоцезия в 2012 г. было около 312 Бк/кг. Видами, наиболее сильно аккумулирующими изотоп цезия, являлись ситник развесистый и щавель густой. Значения КН для этих видов составляли 12,7 и 4,28 Бк/кг:Бк/кг.

Средние значения КН для системы почва – растение по годам исследований составляли 3,68 и 2,45 Бк/кг : Бк/кг, а для системы почвогрунт – растение – 0,93 и 0,77 Бк/кг : Бк/кг. На объекте выявлены большие переходы радионуклида в системе почва – растение.

В условиях 2022 г. выявлено меньшее содержание радиоцезия в травостое. Оно составляло от 52 до 82% от первоначального содержания.

Прибрежно-водная растительность объекта 6 представлена 13 видами входящих в состав 6 групп. Наиболее многочисленной группой являются гигрогелофиты среднерослые, а также эуигрофиты среднерослые.

Содержание радиоцезия в растительности объекта 6 в 2012 г. находилось в пределах от 56 до 471 Бк/кг (табл. 8). Различия по изучаемому параметру между группами растений достаточно велики. При среднем значении содержания радиоцезия в растительности объекта в 2012 г.

198 Бк/кг средние значения для гигрогелофитов среднерослых составили 186 Бк/кг, для эуигрофитов среднерослых – 100 Бк/кг. Наиболее высокое содержание радиоцезия (471 Бк/кг) выявлено для фитомассы осоки острой.

За период с 2012 по 2022 г. содержание радиоцезия в прибрежно-водной растительности снизилось до 55–70% от исходных значений.

Субстраты объекта 6 представлены почвой и почвогрунтом. Средние значения КН за 2012 г. и 2022 г. для системы почва – растение составляли 0,52 и 0,46 Бк/кг : Бк/кг соответственно, а для системы почвогрунт – растение – 0,80 и 0,28 Бк/кг:Бк/кг. Значения КН были более высокими для почвогрунта. Значения КН для растительности объекта 3 были достаточно схожими и были в пределах 0,18–1,63 Бк/кг : Бк/кг.

Прибрежно-водная растительность объекта 7 характеризуется небольшим количеством видов. Несколько большим количеством видов выделяется группа аэрогидрофитов среднерослых. Накопление радиоцезия фитомассой находится в пределах от 31 до 636 Бк/кг (табл. 9).

Таблица 8

Аккумуляция ^{137}Cs прибрежно-водными растениями пойменного луга р. Сож Чечерского района, объект 6

[Table 8]

Accumulation of ^{137}Cs by riparian-aquatic plants of the floodplain meadow of the Sozh river, Chechersky district, object 6]

Вид растения [Type of plant]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg:Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Плейстогидрофиты укореняющиеся [Pleistohydrophytes rooting]				
Кувшинка белая [<i>Nymphaea alba</i>]	119±22	84±14	0,41	0,40
Аэрогидрофиты высокорослые [Aerohydrophytes are tall]				
Манник большой [<i>Glyceria maxima</i>]	56±16	34±4	0,19	0,16
Аэрогидрофиты среднерослые [Aerohydrophytes are medium – sized]				
Осока острая [<i>Carex acuta</i>]	471±69	260±46	1,63	0,96
Эуигрофиты среднерослые [Eugigrophytes are medium – sized]				
Мята полевая [<i>Mentha arvensis</i>]	138±22	82±10	0,40	0,30
Щавель густой [<i>Rumex confertus</i>]	97±26	56±4	0,28	0,21
Вербейник обыкновенный [<i>Lysimachia vulgaris</i>]	65±13	38±3	0,19	0,14
Гигрогелофиты высокорослые [Hydrogeloephytes are tall]				
Камыш лесной [<i>Scirpus sylvaticus</i>]	259±34	140±19	0,75	0,51
Гигрогелофиты среднерослые [Hydrogeloephytes are medium – sized]				
Аир обыкновенный [<i>Acorus calamus</i>]	296±48	160±24	0,86	0,59
Чистец болотный [<i>Stachys palustris</i>]		120±13	0,59	0,44

Вид растения [Type of plant]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg:Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Репешок обыкновенный [<i>Agrimonia eupatoria</i>]		170±23	0,98	0,82
Василистник желтый [<i>Thalictrum flavum</i>]		51±8	0,24	0,19
Таволга вязолистная [<i>Filipendula ulmaria</i>]		35±3	0,18	0,13
Горошек мышиный [<i>Vicia cracca</i>]		260±36	1,22	0,96

Таблица 9

Аккумуляция ^{137}Cs прибрежно-водными растениями пойменного луга р. Сож Чечерского района, объект 7

[Table 9]

Accumulation of ^{137}Cs by riparian-aquatic plants of the floodplain meadow of the Sozh river, Chechersky district, object 7

Вид растения [Type of plant]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Specific activity of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation coefficient, Bq/kg:Bq/kg]	
	2012	2022	2012	2022
Плейстогидрофиты укореняющиеся [Pleistohydrophytes rooting]				
Горец земноводный [<i>Persicaria amphibia</i>]	88±15	59±14	1,57	1,20
Аэрогидрофиты среднерослые [Aerohydrophytes are medium – sized]				
Осока острая [<i>Carex acuta</i>]	440±60	250±50	7,86	5,10
Осока лисья [<i>Carex vulpina</i>]	636±80	390±81	11,36	7,96
Сусак зонтичный [<i>Butomus umbellatus</i>]	44±10	30±3	0,80	0,61
Частуха подорожниковая [<i>Alisma plantago-aquatica</i>]	78±13	42±5	1,40	0,86
Эугигрофиты высокорослые [Eugygrophytes are tall]				
Двукосточник тростниковидный [<i>Phalaris arundinacea</i>]	176±35	95±10	0,23	0,18
Эугигрофиты среднерослые [Eugigrophytes are medium – sized]				
Поручейник широколистный [<i>Sium latifolium</i>]	31±9	23±2	0,04	0,04

Среднее значение содержания ^{137}Cs в фитомассе в 2012 г. составляло около 149 Бк/кг. Для группы аэрогидрофитов среднерослых это значение составило 300 Бк/кг. Максимальным накоплением радионуклида на объекте 7 отличались осоки – 440–636 Бк/кг.

Через 10 лет после первоначального определения параметра выявлено закономерное снижение данного показателя. Удельная активность ^{137}Cs в фитомассе в 2022 г. составляла от 54 до 74% от первоначального определения.

Средние значения КН для системы почва – растение в 2012 и 2022 гг. составляли соответственно 0,14 и 0,11 Бк/кг : Бк/кг, а системы почвогрунт – растение – 4,60 и 3,15 Бк/кг: Бк/кг. Имеют место значительно большие значения параметра для почвогрунта.

По изученным объектам исследований Чечерского района за 2012–2022 гг. средние значения КН для системы вода – растение составляли 34,3–15,7; а максимальные и минимальные значения КН для систем почва – растение – 3,68–0,11; почвогрунт – растение – 4,60–0,21 Бк/кг:Бк/кг.

Средние значения КН для почвы в 2012 г. 1,44 и 2022 г. 1,01 Бк/кг:Бк/кг, а для почвогрунта 1,70 и 1,10 Бк/кг:Бк/кг соответственно.

На основе полученных данных можно ранжировать группы объектов Чечерского района в порядке возрастания содержания радиоцезия следующим образом.

Объект 4. Плейстогидрофиты укореняющиеся > Гидрофиты > Аэрогидрофиты среднерослые > Эугигрофиты высокорослые > Гигрогелофиты среднерослые. Объект 5. Аэрогидрофиты высокорослые > Плейстогидрофиты укореняющиеся > Гигрогелофиты среднерослые > Аэрогидрофиты среднерослые > Эугигрофиты среднерослые. Объект 6. Аэрогидрофиты высокорослые > Эугигрофиты среднерослые > Плейстогидрофиты укореняющиеся > Гигрогелофиты среднерослые > Гигрогелофиты высокорослые > Аэрогидрофиты среднерослые. Объект 7. Эугигрофиты среднерослые > Плейстогидрофиты укореняющиеся > Эугигрофиты высокорослые > Аэрогидрофиты среднерослые.

В результате проведенных исследований не выявлены одинаковые доминирующие группы прибрежно-водных растений по накоплению радиоцезия по объектам как Ветковского, так и Чечерского районов. Количество групп по объектам составляло от 3–4 по Ветковскому району до 4–6 по Чечерскому району.

Заключение

В изучаемых объектах на территории Ветковского района выявлены 6 групп прибрежно-водной растительности. В состав гидрофитов, плейстогидрофитов укореняющихся входило по 1 виду, аэрогидрофитов высокорослых и гигрогелофитов среднерослых – по 2 вида. По 5–6 видов растений выделено в группах аэрогидрофитов среднерослых и эуигрофитов среднерослых. На объектах 1 и 2 выделено по 5 видов растений, на объекте 3 – 7 видов.

В изученных объектах прибрежно-водной растительности на территории Чечерского района выделено 8 экологических групп. Эти группы более многочисленны по количеству составляющих их видов по сравнению с Ветковским районом. Малочисленными по количеству видов являются группы гидрофитов (1 вид), гигрогелофитов среднерослых (1 вид), аэрогидрофитов высокорослых (3 вида), эуигрофитов высокорослых (3 вида).

На объекте 4 зафиксировано 11 видов, относящихся к 5 группам, для объекта 5 – 10 видов и 5 групп соответственно, объекта 6 – 13 видов и 6 групп. Наименьшее разнообразие выявлено для объекта 7 – 7 видов и 4 группы.

Одной из задач исследований было выявление накопления радиоцезия в субстратах прибрежно-водных растений. В воде всех объектов содержание изотопа цезия было менее 3 Бк/кг.

Установлено, что с течением времени произошло снижение количества радиоцезия и в почве, и в почвогрунте.

В исследованиях не выявлены существенные различия по содержанию изотопа в почве и почвогрунте. Тем не менее, зафиксированы ситуации, когда при максимальном загрязнении почвы загрязнение почвогрунта невысокое.

Установлено, что в условиях 2012 г. на изучаемых объектах выявлено 10 видов растений с превышением нормативов РДУ/ЛТС-2004. Это хвощ полевой, сабельник болотный, вербейник обыкновенный (Ветковский район), осока острая, осока лисья, поручейник широколистный, щавель густой, ситник развесистый, чистец болотный, горошек мышиный (Чечерский район). В 2022 г. превышение допустимого уровня отмечено у 3 видов растений в Ветковском районе и у 4 в Чечерском. Различия по удельной активности ^{137}Cs в анализируемых видах растений могут достигать 148 раз.

Установлено, что даже в условиях одной экологической группы произрастают растения с существенными различиями по содержанию ^{137}Cs .

В результате проведенных исследований не выявлены одинаковые доминирующие группы прибрежно-водных растений по накоплению радиоцезия по объектам Ветковского и Чечерского районов.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Авторы осуществляли сбор, анализ материала, написание текста статьи, согласны нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащие расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой частью работы.

Благодарности

Выражаем благодарность анонимным рецензентам за рецензирование статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Выполнение финансируемого проекта «Прогноз развития фитоценологических систем на основе моделирования пойменных лугов р. Сож, загрязненных радионуклидами, в условиях изменения гидрологического режима».

Литература

1. Рекомендации по улучшению суходольных и низинных лугов, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Под ред. И.М. Богдевича. Мн., 2004. 69 с.
2. Сапегин Л.М., Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Эколого-флористическая характеристика и продуктивность луговых экосистем поймы р. Сож и пригорода г. Гомеля / Пойменные луговые экосистемы как объекты с высоким фиторазнообразием, их изучение и картирование: Материалы Междунар. науч.-практ. семинара, г. Гомель, 11-12 июня 2009 г. Редкол.: Л.М. Сапегин (отв. ред.) и др. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. С. 13-25.
3. Подольяк А.Г., Богдевич И.М., Ивашкова И.И. Прогнозирование величины накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостоях основных типов лугов белорусского поля по агрохимическим свойствам почв // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. 2007. № 3. С. 54-62.
4. Демина М.И., Соловьев А.В., Четчина Н.В. Геоботаника с основами экологии и географии растений: учебное пособие. М.: ФГБОУ ВПОРГАЗУ, 2013. 148 с.
5. Садчиков А.П., Кудряшов М.А. Экология прибрежно-водной растительности (учебное пособие для студентов вузов). М.: Изд-во НИИ-Природа, РЭФИА, 2004. 220 с.
6. Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Состав и структура пойменных лугов бассейна р. Сож. Монография. Чернигов, Десна Полиграф, 2020. 208 с.
7. Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Радиоактивное загрязнение лекарственных растений некоторых районов Гомельской области, приграничных с территорией Брянской области России // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 9. С. 57 – 63.
8. Шарипова О.А. Содержание радионуклидов в донных отложениях озера Балхаш // Гидрометеорология и экология. 2012. №4. С. 101 – 105.
9. Киселев Г.П., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В. и др. Естественная и техногенная радиоактивность донных отложений озер северо-запада России (на примере республики Карелия и Архангельской области) // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 152-157.
10. Борисенко Г.С. Содержание радионуклидов в прибрежных донных осадках Амурского залива (Японское море) // Фундаментальные исследования. 2006. № 8. С. 26-26.
11. Никитин А.Н. Зубарева А.В., Шуранкова Д.В., Сухарева О.А. Распределение долгоживущих радионуклидов замкнутых водоемов на этапе отдаленных последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века. Материалы 18-й международной научной конференции, 17–18 мая 2018 г., г. Минск, Республика Беларусь: в 3 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та. Минск: ИВЦ Минфина, 2018. Ч. 2. С. 228-229.
12. Кайгородов Р.В. Распределение техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в компонентах водных экосистем Тюменской области // Успехи современного естествознания. 2021. № 11. С. 64-69.

13. Методика полевых геоботанических исследований. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1938. 215 с.
14. Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1974. 404 с.
15. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС). Мн., 1995. 582 с.
16. Сапегин Л.М., Дайнеко Н.М. Хозяйственная типология пойменных лугов Белорусского Полесья. Изучение и сохранение пойменных лугов: материалы Международного совещания, Калуга, 26 – 28 июня 2013 года. Калуга: ООО «Ноосфера», 2013. С. 53–58.
17. Гигевич Г.С., Власов Б.П., Вынаев Г.В. Высшие водные растения Беларуси: эколого-биологическая характеристика, использование и охрана. Минск: БГУ, 2001. 230 с.
18. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В.И. Парфенова. Мн.: Дизайн ПРО, 1999. 472 с.

Поступила: 19.07.2023 г.

Дайнеко Николай Михайлович – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины. **Адрес для переписки:** 246028, Республика Беларусь, Гомель, ул. Советская, д. 104; E-mail Dajneko@gsu.by

Тимофеев Сергей Федорович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь

Для цитирования: Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Накопление ^{137}Cs экологическими группами прибрежно-водной растительности пойменных лугов реки Сож // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 44-54. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-44-54

Accumulation of ^{137}Cs by ecological groups of coastal-aquatic vegetation of floodplain meadows of the Sozh river

Nikolay M. Daineko, Sergey F. Timofeev

Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus

The purpose of the study is to identify differences in the content of ^{137}Cs in the phytomass of coastal aquatic vegetation of the Vetka and Chechersk districts of the Gomel region for the period 2012–2022. The description and identification of ecological groups of coastal aquatic vegetation and the sampling of soil and plants to determine the content of radiocesium in the growing seasons of 2012 and 2022 were carried out according to generally accepted methods. It was found that the content of ^{137}Cs in water samples from the objects of Vetka district did not exceed the normative value for drinking water (10 Bq/kg). The average specific activity of radiocesium in the soil for the studied objects was 807 ± 125 and 586 ± 84 Bq/kg in 2012 and 2022, respectively; and for soil was 549 ± 85 and 395 ± 46 Bq/kg respectively. Over time, there was a decrease in the amount of radiocesium in soil and in ground by 1.3–1.4 times. The average content of the isotope in the plants in 2012 and 2022 was 93–917 and 59–578 Bq/kg, respectively. The amplitude of variation in the average values of accumulation coefficient in the soil-plant system was 1.03 and 0.11 Bq/kg:Bq/kg in 2012 and 2022, respectively. In the ground-plant system it was 3.08 and 0.01 Bq/kg:Bq/kg, respectively. The specific activity of ^{137}Cs in the water of objects in the Chechersk region did not exceed 3 Bq/l. The average content of ^{137}Cs in the ground was 316 and 231 Bq/kg in 2012 and 2022, respectively. The same parameters for the soil were within the limits of 471 and 340 Bq/kg, respectively. The average content of ^{137}Cs in phytomass varied from 149 to 483 Bq/kg in 2012. After 10 years, the amount of radionuclide was 115–288 Bq/kg. The average values of accumulation coefficient in the soil-plant system in 2012 and 2022 were 1.44 and 1.01 Bq/kg:Bq/kg, and in the soil-plant system were 1.70 and 1.10 Bq/kg:Bq/kg, respectively. As a result of the study, similar dominant groups of coastal aquatic plants were not identified in terms of the accumulation of radiocesium in the objects of the Vetka and Chechersk regions.

Key words: ^{137}Cs , radioactive contamination, radionuclide specific activity, radiological analysis, coastal aquatic plants, ecological groups.

Nikolay M. Daineko

Francisk Skorina Gomel State University

Address for correspondence: Sovetskaya str., 104, Gomel, 246028, Republic of Belarus; E-mail: dajneko@gsu.by

Information about the personal contribution of the authors to the work on the article

The authors collected, analyzed the material, wrote the text of the article, agree to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.

Acknowledgements

We express our gratitude to anonymous reviewers for reviewing the article.

Information about the conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Information about the source of funding

Implementation of the funded project "Forecast of the development of phytocoenotic systems based on the modeling of floodplain meadows of the river. Sozh contaminated with radionuclides in the conditions of changes in the hydrological regime".

References

- Recommendations for the improvement of upland and low-land meadows exposed to radioactive contamination. Ed. IM Bogdevich. Minsk; 2004. 69 p. (In Russian).
- Sapegin LM, Daineko NM, Timofeev SF. Ecological and floristic characteristics and productivity of meadow ecosystems of the floodplain of the river. Sozh and the suburbs of the city of Gomel. Floodplain meadow ecosystems as objects with high phytodiversity, their study and mapping: Proceedings of the Intern. scientific-practical. seminar, Gomel, June 11-12, 2009 / ed.: LM Sapegin (responsible ed.) et al. Gomel: GSU im. F. Skorina; 2009. P. 13-25. (In Russian).
- Podolyak AG, Bogdevich IM, Ivashkova II. Forecasting the accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the grass stands of the main types of meadows of the Belarusian woodland according to the agrochemical properties of soils. *Vestsi natsyonal'noy akademii navuk Belarusi = Vests of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2007;3: 54-62. (In Russian).
- Demina MI, Solovyov AV, Chechetkina NV. Geobotany with the basics of plant ecology and geography: a textbook. Moscow: FGBOU V PORGAZU; 2013. 148 p. (In Russian).
- Sadchikov AP, Kudryashov MA. Ecology of coastal aquatic vegetation (textbook for university students). Moscow: Publishing house NIA-Priroda, REFIA; 2004. 220 p. (In Russian).
- Daineko NM, Timofeev SF. Composition and structure of floodplain meadows of the river basin. Sozh. Monograph. Chernihiv: Desna Polygraph; 2020. 208 p. (In Russian).
- Daineko NM, Timofeev SF. Radioactive contamination of medicinal plants in some areas of the Gomel region, bordering with the territory of the Bryansk region of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(9): 57 – 63. (In Russian).
- Sharipova OA. The content of radionuclides in the bottom sediments of Lake Balkhash. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2012;4:101-105. (In Russian).
- Kiselev GP, Yakovlev EYu, Druzhinin SV, Kiseleva IM, Bazhenov AV, Bykov VM. Natural and technogenic radioactivity of bottom sediments of lakes in the north-west of Russia (on the example of the Republic of Karelia and the Arkhangelsk region). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Successes of modern natural sciences*. 2017;12: 152-157. (In Russian).
- Borisenko GS. The content of radionuclides in coastal bottom sediments of the Amur Bay (Sea of Japan). *Fundamentalnye issledovaniya = Fundamental Research*. 2006;8: 26-26. (In Russian).
- Nikitin AN, Zubareva AV, Shurankova DV, Sukhareva OA. Distribution of long-lived radionuclides in closed water bodies at the stage of remote consequences of the catastrophe at the Chernobyl nuclear power plant. Sakharov Readings 2018: Environmental Problems of the 21st Century. Proceedings of the 18th International Scientific Conference, May 17–18, 2018, Minsk, Republic of Belarus: at 3 pm / International. state ecol. in-t im. A.D. Sakharova Bel. state university. Minsk: Information Center of the Ministry of Finance; 2018. Part 2. P. 228-229. (In Russian).
- Kaigorodov RV. Distribution of technogenic radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in the components of aquatic ecosystems of the Tyumen region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Successes of modern natural sciences*. 2021;11: 64-69. (In Russian).
- Methods of field geobotanical research. Moscow, Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1938. 215 p. (In Russian).
- Program and methodology of biogeocenological research. Moscow: Nauka; 1974. 404 p. (In Russian).
- Radioactive contamination of vegetation in Belarus (due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant). Minsk; 1995. 582 p. (In Russian).
- Sapegin LM, Daineko NM. Economic typology of floodplain meadows of Belarusian Polissya. Study and conservation of floodplain meadows: proceedings of the International meeting, Kaluga, June 26-28, 2013. Kaluga: LLC "Noosphere"; 2013. P. 53 – 58. (In Russian).
- Gigevich GS, Vlasov BP, Vynaev GV. Higher aquatic plants of Belarus: ecological and biological characteristics, use and protection. Minsk: BGU; 2001. 230 p. (In Russian).
- Determinant of higher plants of Belarus. Ed. VI Parfenov. Minsk: Design PRO; 1999. 472 p. (In Russian).

Received: July 19, 2023

For correspondence: Nikolay M. Daineko – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Francisk Skorina Gomel State University (Sovetskaya str. 104, Gomel, Republic of Belarus, 246028; E-mail: dajneko@gsu.by)

Sergey F. Timofeev – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Botany and Physiology, Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus

For citation: Daineko N.M., Timofeev S.F. Accumulation of ^{137}Cs by ecological groups of coastal-aquatic vegetation of floodplain meadows of the Sozh river. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 44-54. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-44-54

Структура потребления лесных грибов жителями загрязненных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС

К.В. Варфоломеева, С.А. Зеленцова, 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 приведены результаты изучения уровней потребления разных видов лесных грибов жителями наиболее загрязненных юго-западных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. Для сбора и анализа данных был применен метод очного анкетирования взрослого населения по индивидуальным опросным анкетам, разработанным специалистами Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева. В анкеты, помимо общих сведений, входили вопросы о видовом составе грибной корзины, объеме и доле потребления каждого вида грибов респондентом и членами его семьи (как в текущем, так и в прошлом сезоне). В период с 2019 по 2022 г. в рамках реализации мероприятий «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» сотрудниками института радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева было проведено анкетирование респондентов. На основании анализа данных индивидуальных опросов 1756 респондентов взрослого населения была выявлена группа (61% опрошенных), которая потенциально может получить дополнительный вклад в дозу внутреннего облучения от потребления грибов. Согласно проведенным исследованиям, в среднем на местного жителя (включая тех, кто исключил грибы из своего рациона питания) приходится 4,7 кг/год, среднее потребление грибов группой респондентов, в рацион питания которых входят грибы, составляет 7,9 кг/год на человека. Структура грибного рациона для респондентов, употребляющих грибы в пищу, имеет следующий вид: белые грибы (28%), лисички (19%), маслята (14%), подосиновики (11%), подберезовики (10%), опята (9%), грузди и рыжики (5%), рядовки (3%), сыроежки (0,3%) и разные редко потребляемые виды грибов (вешенки, волнушки, свинушки, сморчки, строчки, польский гриб и шампиньоны – 1%).

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, Брянская область, радиоактивное загрязнение, ^{137}Cs , лесные грибы, опросы населения, рацион питания, структура потребления.

Введение

Одним из последствий радиоактивного загрязнения лесов юго-западных районов Брянской области в результате аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) стало накопление цезия-137 (^{137}Cs) в лесных грибах и ягодах [1]. По данным Росгидромета, на 2023 г. 1852 населенных пункта (НП) Брянской области находятся в границах территорий с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs выше 1 Ки/км² (или 37 кБк/м²) [2].

Большая часть населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях рассматриваемого региона, представлена жителями сельских НП, особенностью рациона питания которых является то, что основную часть их рациона составляют сельскохозяйственная продукция местного производства и продукты лесного происхождения – ягоды и грибы, собранные в лесных массивах,

находящихся, как правило, вблизи НП проживания. Согласно данным опросов о структуре рационов питания местного населения и его изменениях, связанных с аварией, потребление дикорастущих грибов за все время наблюдений, начиная с первых лет после аварии (1986–2015 гг.), варьировало от 2,2 кг/год (в неурожайный год) до 11 кг/год (в урожайный год) [3]. В среднем за период с 1987 по 1996 г. потребление грибов населением юго-западных районов Брянской области увеличилось почти на 22% [4]. В период с 1991 по 1993 г. потребление грибов составило 3 кг в год [5], с 2005 по 2012 гг. потребление грибов варьировало от 1,3–1,7 кг на человека в неурожайный год и до 3,3–11,4 кг на человека – в урожайный [6]. С 2008 по 2015 г. среднее потребление грибов выросло с 6,1 до 6,6 кг в год [3, 7]. После 2015 г. потребление грибов продолжало увеличиваться, что было связано не

Варфоломеева Ксения Владимировна

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

только со сложившимися неблагоприятными экономическими условиями в регионе и ослаблением ограничений и самоограничений, но и с общим пренебрежением опасностью употребления радиоактивно загрязненной продукции леса [3].

Анализ опубликованных данных показал, что 45% исследованных проб сырых грибов, собранных на территориях с плотностью радиоактивного загрязнения ^{137}Cs выше 1 Ки/км^2 , не соответствуют гигиеническим нормативам по содержанию в них ^{137}Cs [8]. Можно утверждать, что потребление грибов является для местных жителей фактором долговременного поступления ^{137}Cs в организм.

В связи с тем, что разные виды грибов обладают различной накопительной способностью по отношению к ^{137}Cs [9–11], вклад грибной компоненты рациона в дозу внутреннего облучения населения варьирует в широких пределах. При этом максимальный вклад грибов в дозу внутреннего облучения может достигать 75–82% [3, 12].

Для проведения реалистичных оценок уровней поступления ^{137}Cs в организм жителей радиоактивно загрязненных территорий Брянской области за счет потребления ими лесных грибов и дальнейшего прогнозирования динамики его поступления следует учитывать видовую структуру грибной компоненты рациона местного населения.

Цель исследования – изучить уровни потребления разных видов грибов жителями юго-западных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС.

Материалы и методы

Для количественной оценки уровней потребления разных видов грибов был применен метод очного анкетирования населения [13]. Опросы проводили по специально разработанной специалистами Научно-исследовательского института радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева (ФБУН НИИРГ) индивидуальной опросной анкете¹ [6].

Опрос респондентов проводили в период с 2019 по 2022 г. в рамках реализации мероприятий «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» [14].

Для проведения опросов были выбраны населенные пункты, расположенные в границах радиоактивно загрязненных территорий юго-западных районов Брянской области (Гордеевского, Злынковского, Климовского, Клинцовского, Красногорского и Новозыбковского)² (рис. 1).

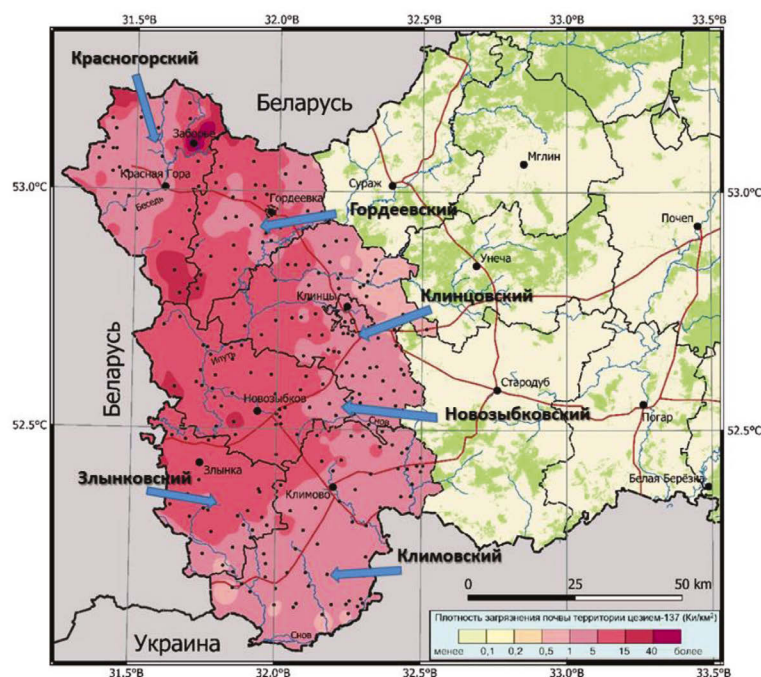


Рис. 1. Карта-схема радиоактивного загрязнения юго-западных районов Брянской области [15]
[Fig. 1. Map-scheme of radioactive contamination of the south-western districts of the Bryansk region [15]

¹ Методические рекомендации МР 2.6.1.0006-10 «Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения». М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 10 с. [MR 2.6.1.0006-10. Carrying out of the comprehensive expeditionary radiation-hygienic survey of the settlement to assess population exposure doses. Methodical guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor; 2010. 10 p. (In Russ.)]

² Постановление Правительства РФ от 08.10.2015 г. № 1074 «Об утверждении перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» [Resolution of the Government of the Russian Federation of 08.10.2015 N 1074 "On approval of the list of settlements located within the boundaries of radioactive contamination zones as a result of the Chernobyl NPP catastrophe". (In Russ.)]

Анкетирование проводили среди населения разных возрастных групп, постоянно проживающего на радиоактивно загрязненных территориях. В рамках данной работы анализировали анкеты группы респондентов только взрослого населения (от 18 лет и старше). По результатам анкетирования был сформирован массив данных, содержащий информацию о рационах питания 1756 человек в возрасте от 18 до 94 лет (средний возраст 49 лет), проживающих в

98 НП. В таблице 1 представлены данные количественного распределения респондентов по районам исследования.

С целью анализа уровней и структуры потребления разных видов грибов из общего массива данных была выбрана группа респондентов, потребляющих грибы, – 1035 человек (см. табл. 1). На рисунке 2 приведены данные по количеству респондентов, в рацион питания которых входят разные виды грибов.

Таблица 1

Количество опрошенных респондентов в населенных пунктах радиоактивно загрязненных районов Брянской области

[Table 1]

Number of interviewed respondents in the settlements of radioactively contaminated districts of the Bryansk region

Район исследования [Study area]	Количество НП [number of settlements]	Количество респондентов, чел. [number of respondents, persons]	
		всех [total]	потребляющих грибы [consuming mushrooms]
Гордеевский [Gordeevsky]	15	224	117
Злынковский [Zlynkovsky]	9	170	95
Климовский [Klimovsky]	23	375	234
Клинцы (г.о) [Klintsy (urban district)]	3	111	77
Клинцовский [Klintsovsky]	20	289	181
Красногорский [Krasnogorsky]	11	194	115
Новозыбковский (г.о) [Novozybkovsky (urban district)]	17	393	216
ВСЕГО [TOTAL]:	98	1 756	1 035

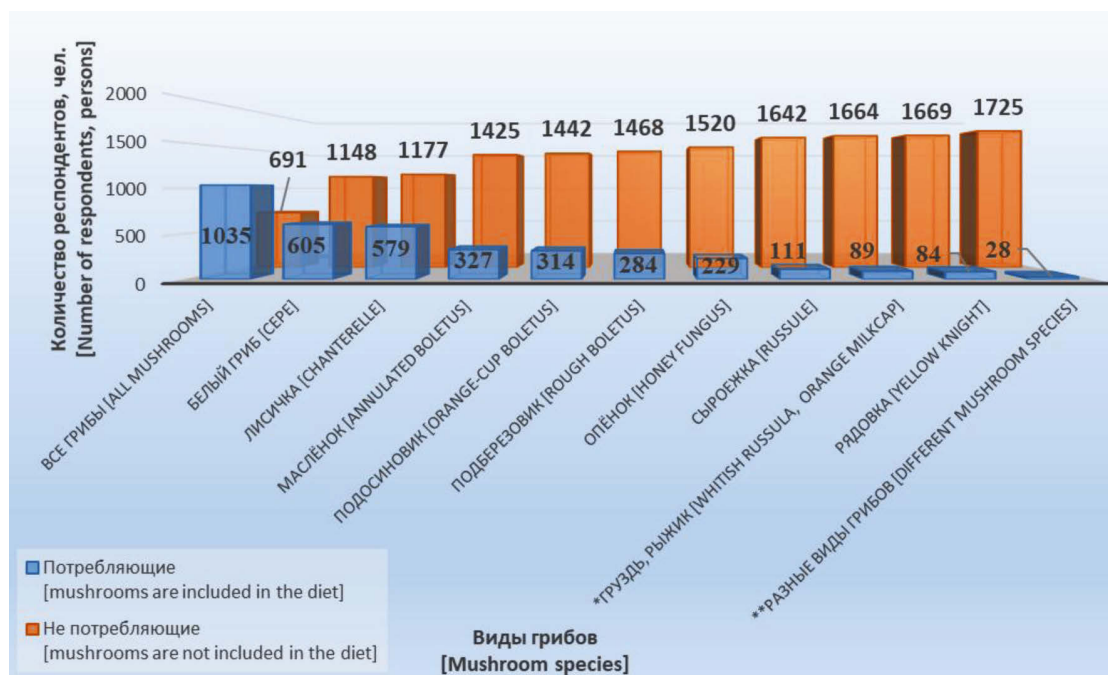


Рис. 2. Употребление разных видов грибов респондентами (* в анкете 2 вида грибов – грузди и рыжики – были объединены в 1 группу, эти виды относятся к семейству сыроежковые рода млечниковые (*Russula delica*, *Lactarius deterrimus*); ** в группу «Разные виды грибов» вошли малопотребляемые населением грибы (от 1 до 6 случаев потребления), такие как: вешенки (*Pleurotus ostreatus*), волнушки (*Lactarius torminosus*), свинушки (*Paxillus*), сморчки (*Morchella*), строчки (*Gyromitra*), польский гриб (*Imleria badia*) и шампиньоны (*Agaricus*))

[Fig. 2. Consumption of different types of mushrooms by respondents (*in the questionnaire, two types of mushrooms milk mushrooms and saffron mushrooms were combined into one group, these species belong to the russula (*Russula*) family of the lactiferous (*Lactarius*) genus. ** the group of different types of mushrooms included mushrooms little consumed by the population (from 1 to 6 cases of consumption), such as: oyster mushrooms, coral milkcaps, paxils, morels, stitches, bay bolete and champignons)]

Для дальнейшего анализа объемов потребления респондентами разных видов грибов использовали данные респондентов, указавших конкретное количество употребленных грибов (съеденных в сезон сбора и /или заготовленных впрок).

Количественная оценка потребления респондентами грибов в сезон сбора выполнялась косвенным методом через оценку объема тары (корзина, ведро), в которую опрашиваемые собирали грибы. Объем тары в литрах переводили в килограммы, используя сведения, полученные из публикации [16]. Как правило, числовые значения массы грибов были в 2 раза меньше объема. Во время проведения опросов у респондентов выясняли, какое количество из всех собранных грибов они употребили в сезон сбора и заготовили для дальнейшего употребления.

Статистический анализ данных (медиана, среднее арифметическое и стандартная ошибка среднего значения) выполнялся с помощью программы MS Excel.

Поскольку потребление респондентами различных видов грибов между собой отличается, оценку вклада каждого i -го вида грибов (P_i) в структуру грибного рациона проводили по следующей формуле:

$$P_i = \frac{m_i \cdot N_i}{N_c}, \quad (1)$$

где:

m_i – среднее количество потребления данного вида грибов, в группе респондентов, включающих их в свой грибной рацион, кг;

N_i – число респондентов, потребляющих данный вид грибов;

N_c – общее число респондентов, употребляющих грибы.

Оценка относительного процентного вклада отдельных видов грибов в структуру их потребления респондентами R_i была выполнена с помощью следующего соотношения:

$$R_i = \frac{P_i}{\sum P_i} \cdot 100 \quad (2)$$

где:

R_i – относительный вклад отдельных видов грибов, %

P_i – оценки вклада каждого i -го вида грибов в структуру грибного рациона у респондентов, включающих грибы данного вида в свой рацион питания.

Результаты и обсуждение

Результаты опроса 1756 респондентов показали, что 39% опрошенных (691 чел.) не потребляют грибы, а у 61% респондентов (1035 чел.) грибы входят в состав рациона питания (табл. 2).

Данные, приведенные в таблице 2, показывают, что потребление респондентами грибов разных биологических видов отличается. Усредненные значения процентного вклада отдельных видов грибов, рассчитанные по формуле (2), оцениваются следующим образом: белые грибы (28%), лисички (19%), маслята (14%), подосиновики (11%), подберезовики (10%), опята (9%), грузди и рыжики (5%), рядовки (3%), сыроежки (0,3%) и разные редко потребляемые виды грибов (1%).

Частотное распределение объемов потребления грибов респондентами из числа потребляющих грибы в период с 2019 по 2022 г. показано на рисунке 3.

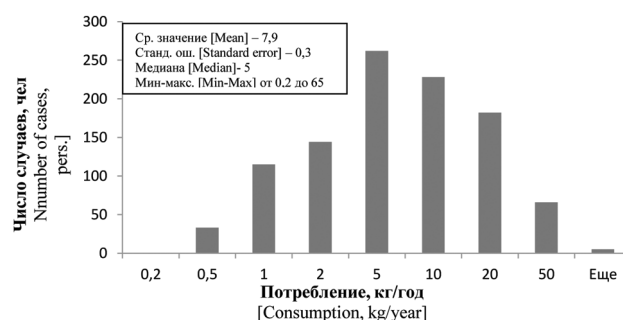


Рис. 3. Частотное распределение объемов потребления грибов респондентами в период с 2019 по 2022 г.

[Fig. 3. Frequency distribution of mushroom consumption volumes by respondents in the period from 2019 to 2022]

Данные, представленные на рисунке 3, показывают, что частотное распределение имеет характер логнормального.

Среднее потребление грибов из расчета на респондентов, включающих их в рацион питания, составляет 7,9 кг/год.

После подстановки в формулу 1 вместо числа респондентов, потребляющих грибы, общего числа опрошенных (1756 чел.), получены средние значения потребления в расчете на 1 жителя для населения в целом. Результаты данной оценки приведены в таблице 3.

Таблица 2
Данные по потреблению респондентами Брянской области разных видов грибов за период с 2019 по 2022 г., кг/год на человека, сырой вес

[Table 2]
Data on the consumption of various types of mushrooms by respondents in the Bryansk region for the period from 2019 to 2022, kg/year per person, wet weight]

Виды грибов (рус./англ./лат.) [Mushroom species (russ. / engl. / lat.)]	Количество респондентов [Mushrooms are included in the diet]	Статистические параметры [Statistical parameters]				
		Среднее значение [Mean]	Стандартная ошибка [Standard error]	Медиана [Median]	Мин. [Min.]	Макс. [Max.]
Все грибы [All mushrooms]	1035	7,9	0,3	5,0	0,2	65
Белый гриб [Сере] (<i>Boletus edulis</i>)	605	3,7	0,2	2,1	0,2	40
Лисичка [Chanterelle] (<i>Cantharellus cibarius</i>)	579	2,6	0,1	2,0	0,2	14

Виды грибов (рус./англ./лат.) [Mushroom species (rus. / engl. / lat.)]	Количество респондентов [Mushrooms are included in the diet]	Статистические параметры [Statistical parameters]				
		Среднее значение [Mean]	Стандартная ошибка [Standard error]	Медиана [Median]	Мин. [Min.]	Макс. [Max.]
Маслёнок [Annulated boletus] (<i>Suillus luteus</i>)	327	3,3	0,2	2,5	0,3	18
Подосиновик [Orange-cup boletus] (<i>Leccinum aurantiacum</i>)	314	2,7	0,1	2,0	0,2	14
Подберезовик [Rough boletus] (<i>Leccinum scabrum</i>)	284	2,6	0,1	2,0	0,2	14
Опёнок [Honey fungus] (<i>Armillaria mellea</i>)	229	2,9	0,2	2,0	0,2	18
Сыроежка [Russule] (<i>Russula</i>)	111	2,0	0,2	1,5	0,2	7,5
*Груздь, рыжик [Whitish russula, orange milkcap] (<i>Russula delica</i> , <i>Lactarius deterrimus</i>)	89	4,4	0,4	3,5	0,3	15
Рядовка [Yellow knight] (<i>Tricholoma equestre</i>)	84	2,5	0,2	1,5	0,4	8
**Разные виды грибов [Different mushroom species]	28	2,9	0,3	3,0	0,6	7,2

* В анкете 2 вида грибов – грузди и рыжики – были объединены в 1 группу, эти виды относятся к семейству сыроежковые рода млечниковые (*Russula delica*, *Lactarius deterrimus*) [*in the questionnaire, two types of mushrooms milk mushrooms and saffron mushrooms were combined into one group, these species belong to the russula (*Russula*) family of the lactiferous (*Lactarius*) genus];

** В группу «Разные виды грибов» вошли малопотребляемые населением грибы (от 1 до 6 случаев потребления), такие как: вешенки (*Pleurotus ostreatus*), волнушки (*Lactarius torminosus*), свинушки (*Paxillus*), сморчки (*Morchella*), строчки (*Gyromitra*), польский гриб (*Imleria badia*) и шампиньоны (*Agaricus*) [** the group of different types of mushrooms included mushrooms little consumed by the population (from 1 to 6 cases of consumption), such as: oyster mushrooms, coral milkcaps, paxils, morels, stitches, bay bolete and champignons].

Таблица 3

Средние уровни потребления отдельных видов грибов в расчете на 1 жителя, кг/год

[Table 3]

Average levels of consumption of certain types of mushrooms per person, kg/year]

Виды грибов (рус./англ./лат.) [Mushroom species (rus. / engl. / lat.)]	Статистические параметры [Statistical parameters]				
	Среднее значение, кг [Mean, kg]	Стандартная ошибка [Standard error]	Медиана [Median]	Мин. [Min.]	Макс. [Max.]
Все грибы [All mushrooms]	4,66	0,18	2,95	0,12	38,31
Белый гриб [Cepe] / (<i>Boletus edulis</i>)	1,27	0,07	0,72	0,07	13,78
Лисичка [Chanterelle] / (<i>Cantharellus cibarius</i>)	0,86	0,03	0,66	0,07	4,62
Маслёнок [Annulated boletus] / (<i>Suillus luteus</i>)	0,61	0,04	0,47	0,06	3,35
Подосиновик [Orange-cup boletus] / (<i>Leccinum aurantiacum</i>)	0,48	0,02	0,36	0,04	2,50
Подберезовик [Rough boletus] / (<i>Leccinum scabrum</i>)	0,42	0,02	0,32	0,03	2,26
Опёнок [Honey fungus] / (<i>Armillaria mellea</i>)	0,38	0,03	0,26	0,03	2,35
*Груздь, рыжик [Whitish russula, orange milkcap] / (<i>Russula delica</i> , <i>Lactarius deterrimus</i>)	0,22	0,02	0,18	0,02	0,76
Сыроежка [Russule] / (<i>Russula</i>)	0,13	0,01	0,09	0,01	0,47
Рядовка [Yellow knight] / (<i>Tricholoma equestre</i>)	0,12	0,01	0,07	0,02	0,38
**Разные виды грибов [Different mushroom species]	0,05	0,005	0,05	0,01	0,11

* В анкете 2 вида грибов – грузди и рыжики – были объединены в 1 группу, эти виды относятся к семейству сыроежковые рода млечниковые (*Russula delica*, *Lactarius deterrimus*) [*in the questionnaire, two types of mushrooms milk mushrooms and saffron mushrooms were combined into one group, these species belong to the russula (*Russula*) family of the lactiferous (*Lactarius*) genus];

** В группу «Разные виды грибов» вошли малопотребляемые населением грибы (от 1 до 6 случаев потребления), такие как: вешенки (*Pleurotus ostreatus*), волнушки (*Lactarius torminosus*), свинушки (*Paxillus*), сморчки (*Morchella*), строчки (*Gyromitra*), польский гриб (*Imleria badia*) и шампиньоны (*Agaricus*) [** the group of different types of mushrooms included mushrooms little consumed by the population (from 1 to 6 cases of consumption), such as: oyster mushrooms, coral milkcaps, paxils, morels, stitches, bay bolete and champignons].

Объемы потребления всех видов лесных грибов варьируют в широком диапазоне – от менее 1,0 до 38,3 кг/год, среднее потребление грибов из расчета на 1 жителя юго-западных районов Брянской области составляет 4,7 кг/год. Медианное значение по потреблению грибов в расчете на одного жителя составляет 3,0 кг/год (см. табл. 3). Наиболее употребляемыми видами грибов за анализируемый период времени являются белые грибы, лисички и маслята. Доля их потребления составляет почти 60%, из которых почти половина приходится на белые грибы. Доля остальных грибов в грибной пищевой корзине составляет около 40%.

Важным обстоятельством при оценке средних значений объема потребления различных видов грибов в расчете на 1 жителя является учет числа жителей, не употребляющих лесные грибы. Анализ данных показал, что доля таких лиц составляет 39%. Это значит, что если удалить их из расчета средних значений уровней потребления, то уровни потребления по отношению ко всему населению будут завышенными почти в 1,6 раза. С другой стороны, если включить их в расчет средних значений, то в дозу облучения от грибной компоненты будут включены 39% не употребляющих грибы. Второй вариант расчета является более предпочтительным, поскольку позволяет более точно оценить вклад грибной компоненты в общем усредненном рационе населения наряду с другими продуктами (молоко, мясо, картофель).

Заключение

На основании анализа данных индивидуальных опросов 1756 респондентов, проживающих на радиоактивно-загрязненных территориях Брянской области, проведенных в период с 2019 по 2022 г., изучены уровни потребления ими разных видов грибов. Результаты опросов показали, что потребляют лесные грибы, и значит, получают дополнительный вклад в дозу внутреннего облучения в результате их потребления 61% респондентов. Среднее потребление грибов всеми респондентами (включая тех, кто исключил грибы из своего рациона питания) и группы респондентов, потребляющих грибы, составляет 4,7 и 7,9 кг/год соответственно.

Структура грибного рациона для респондентов, употребляющих грибы в пищу, имеет следующий вид: белые грибы (28%), лисички (19%), маслята (14%), подосиновики (11%), подберезовики (10%), опята (9%), грузди и рыжики (5%), рядовки (3%), сыроежки (0,3%) и разные редко потребляемые виды грибов (1%).

Таким образом, полученные результаты являются важной основой для оценки уровней поступления ^{137}Cs с лесными грибами в расчете на 1 жителя с учетом вклада в грибной рацион отдельных видов грибов. Для полной взвешенной оценки уровней поступления ^{137}Cs с грибами также требуется учитывать коэффициенты перехода ^{137}Cs из почвы в отдельные виды грибов, долю потребления лесных грибов в зависимости от их кулинарной обработки и эффективность применения разных способов кулинарной обработки грибов.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Варфоломеева К.В. – поиск и анализ литературных данных, опрос респондентов в 2020 и 2022 гг., система-

тизация и обработка массива данных анкетных опросов, статистическая обработка результатов и их оформление, написание, редактирование и окончательное оформление статьи.

Зеленцова С.А. – обработка данных анкетных опросов для последующего анализа, редактирование промежуточных вариантов и окончательного текста статьи.

Репин В.С. – общее руководство выполнением исследования, редактирование промежуточного и окончательного текста статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность заведующей лаборатории внутреннего облучения ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева А.А. Братиловой за оказание содействия в проведении исследований, сотрудникам Т.В. Жеско, Т.А. Кормановской, а также О.С. Кравцовой и О.С. Баженовой (в период проведения исследований являлись сотрудниками ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за возможность использования полученных ими результатов анкетного опроса для обобщения. Авторы благодарны руководителю ИАЦ А.М. Библину за помощь в подготовке иллюстративного материала к статье. Авторы выражают благодарность рецензентам за конструктивные замечания и предложения.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Работа была сделана на основе данных, полученных при выполнении государственного контракта от 18 октября 2019 г. № 0173100001419000019 в рамках «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС», утвержденной постановлением Советом министров Союзного государства от 29 августа 2019 г. № 8.

Литература

1. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой и проф. С.В. Фесенко М.: РАН, 2018. 278 с.
2. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием – 137, стронцием – 90 и плутонием – 239+240 / Под ред. С.М. Вакуловского, подготовил В.Н. Яхрюшин. Обнинск, ФГБУ «НПО «Тайфун», 2023. 228 с.
3. Братилова А.А., Брук Г.Я. Влияние потребления различных пищевых продуктов на формирование доз внутреннего облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 53-59. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-53-59.
4. Травникова И.Г., Брук Г.Я., Шутов В.Н., Базюкин А.В. Пути формирования доз внутреннего облучения сельских жителей Брянской области после аварии на ЧАЭС (часть первая) // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 2. С. 11-20.
5. Муратова, Н.А., Давыдова А.Н. Оценка рационов питания жителей Брянской области за период 1985-2005 гг.

- Сборник научных докладов международного семинара «Оценка доз облучения жителей Брянской области на основе измерения содержания ^{137}Cs в организме облучаемого контингента». ИБРАЭ РАН, 16–17 ноября 2006. М. С. 32–39.
6. Травникова И.Г. Динамика изменений рационов питания населения Брянской области, живущего на территориях, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 26–32.
 7. Трапезникова Л.Н. Гигиеническая оценка фактического питания населения Брянской области // Здоровье населения и среда обитания. 2009. № 6. С. 20–23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gigienicheskaya-otsenka-fakticheskogo-pitaniya-naseleniya-bryanskoj-oblasti> (Дата обращения 17.02.2023).
 8. Романович И.К., Брук Г.Я., Барковский А.Н. и др. Обоснование Концепции перевода населенных пунктов, отнесенных в результате аварии на Чернобыльской АЭС к зонам радиоактивного загрязнения, к условиям нормальной жизнедеятельности населения // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 1. С. 6–18.
 9. Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бекашева Т.А. и др. Радиоактивное загрязнение грибов в отдаленный период после аварии на ЧАЭС. Сборник материалов межд. науч.-практ. конф. «Радиационно-гигиенические последствия и уроки аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. Санкт-Петербург: ФБУН им. П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. С. 111–115.
 10. Зарубина, Н.Е., Тришин В.В. Радионуклидное загрязнение высших грибов в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Сборник трудов межд. конф. «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий», Москва 5–6 декабря 2005. М., 2005. Т. 3. С. 109–118.
 11. Переволоцкий А.Н., Гаврилов А.В., Булавик И.М. Радиоэкология. Гомель, 1998. 99 с.
 12. Панов, А.В., Марочкина Е.В., Пономаренко В.В. О роли грибов в формировании доз внутреннего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных в следствии аварии на ЧАЭС территориях // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 63–70.
 13. Репин Л.В., Библин А.М., Вишнякова Н.М. и др. Проблемы риск-коммуникации: методические подходы к использованию социологических данных в планировании информационной работы с населением по вопросам радиационной безопасности // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 50–57. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-50-57.
 14. Программа совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. URL: <https://rusbelmeteo.ru/programs/chernobylunionprogram> (Дата обращения 20.02.2023).
 15. Романович И.К., Базюкин А.Б., Барковский А.Н. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 1: Характеристика населенных пунктов // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 22–36. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-22-36.
 16. Травникова И.Г. Эффективность защитных мероприятий по снижению дозы внутреннего облучения радионуклидами цезия жителей зоны радиоактивного загрязнения: дис. ... канд. биол. наук : 14.00.07: защищена 29.11.1990 / Травникова Ирина Георгиевна; Ленингр. НИИ радиационной гигиены. Л., 1990. 176 с.

Поступила: 21.04.2023 г.

Варфоломеева Ксения Владимировна – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: varfolomeeva_K@mail.ru

Зеленцова Светлана Александровна – 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

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Репин В.С. Структура потребления лесных грибов жителями загрязненных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С 55–63. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-55-63

Consumption structure of forest mushrooms by residents of contaminated districts of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident

Kseniya V. Varfolomeeva, Svetlana A. Zelentsova, Viktor S. Repin

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

The article presents results of the study of consumption levels of different types of forest mushrooms by residents of the most contaminated south-western territories of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident. To collect and analyze the data, the method of face-to-face questionnaire survey of adult population was applied according to individual questionnaires developed by the staff of Federal Funded Institution of Science «Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev». In addition to general information, the questionnaires included questions about the species composition of the mushroom basket, the volume and proportion of consumption of each type of mushrooms by the respondent and his/her family members (both in the current and previous seasons). In the period from 2019 to 2022, within the framework of the “Program of joint activities of Russia and Belarus in the framework of the Union State for the protection of the population and rehabilitation of the territories affected by the Chernobyl NPP disaster”, the staff of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev conducted the questionnaire survey of the respondents. Based on the analysis of data from individual interviews with 1 756 adult respondents, the group (61% of respondents) that could potentially receive an additional contribution to internal dose from mushroom consumption was identified. According to the research, the average consumption of mushrooms by the local population (including those who excluded mushrooms from their diet) is 4,7 kg/year per person, while the average consumption of mushrooms by the group of respondents whose diet includes mushrooms is 7,9 kg/year per person. The structure of the mushroom diet for respondents who eat mushrooms is as follows: cep / boletus edulis (28%), chanterelles / cantharellus cibarius (19%), annulated boletus / suillus luteus (14%), orange-cup boletus / leccinum aurantiacum (11%), rough boletus / leccinum scabrum (10%), honey fungus / armillaria mellea (9%), whitish russula / russula delica and orange milkcap / lactarius deterrimus (5%), yellow knight / tricholoma equestre (3%), russules / russula (0,3%) and various rarely consumed mushrooms (oyster mushrooms, coral milkcaps, paxils, morels, stitches, bay bolete and champignons – 1%).

Key words: Chernobyl NPP accident, Bryansk region, radioactive contamination, ^{137}Cs , mushrooms, population surveys, diet, structure of forest mushrooms consumption.

Personal contribution of authors

Varfolomeeva K.V. – literature data search and analysis, survey of respondents in 2020 and 2022, systematization and processing of the questionnaire survey data set, statistical processing of the results and their design, writing, editing and finalization of the article.

Zelentsova S.A. – processing of questionnaire data for further analysis, editing of intermediate versions and the final text of the article.

Repin V.S. – general management of the research, editing of the intermediate and final text of the article.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to A.A. Bratilova, Head of the Laboratory of Internal Irradiation at the FBUN NIIRG named after P.V. Ramsaev, for assistance in conducting the research, employees T.V. Zhesko, T.A. Kormanovskaya, as well as O.S. Kravtsova and O.S. Bazhenova (during the period of research they were employees of FBUN NIIRG named after P.V. Ramsaev) for the opportunity to use the results of the questionnaire survey obtained by them. The authors are grateful to the head of the IAC A.M. Biblin for assistance in preparing the illustrative material for

the article. The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments and suggestions.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Information about the source of funding

The work was done on the basis of data obtained during the execution of the state contract No. 0173100001419000019 dated October 18, 2019 within the framework of the Program of joint activities of Russia and Belarus within the Union State on protection of the population and rehabilitation of the territories affected by the Chernobyl NPP catastrophe, approved by the Resolution of the Council of Ministers of the Union State No. 8 dated August 29, 2019.

References

1. Radioecological consequences of the Chernobyl NPP accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas / Ed.: prof. NI Sanzharova, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, and prof. SV Fesenko, Moscow: Russian Academy of Sciences; 2018. 278 p. (In Russian).

Kseniya V. Varfolomeeva

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

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

2. Data on radioactive contamination of the territory of settlements of the Russian Federation with cesium – 137, strontium – 90 and plutonium – 239 + 240 / Ed.: SM Vakulovsky, prepared by VN Yakhryushin. Obninsk: FGBU "NPO "Typhoon"; 2023. 228 p. (In Russian).
3. Bratilova AA, Bruk GYa. Influence of consumption of different foodstuffs on the internal exposure dose formation in the adult population of the Russian Federation after the accident at the Chernobyl NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 53-59. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-53-59/ (In Russian).
4. Travnikova IG, Shutov VN, Bazyukin AB. Contribution of different foodstuffs to the internal exposure of the rural inhabitants of the Bryansk region in Russia after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(2): 11-20. (In Russian).
5. Muratova NA, Davydova AN. Evaluation of the diets of the inhabitants of the Bryansk region for the period 1985-2005. Collection of scientific reports of the international seminar "Assessment of exposure doses of residents of the Bryansk region based on the measurement of the content of cesium-137 in the body of the irradiated population", IBRAE RAN, November 16–17, 2006. Moscow. P. 32–39. (In Russian).
6. Travnikova IG. The dynamics of food rations of Bryansk region population living in the territories contaminated after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 26-32. (In Russian).
7. Trapeznikova LN. Hygienic assessment of the actual nutrition of the population of the Bryansk region. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Habitat*. 2009;6: 20-23. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/gigienicheskaya-otsenka-fakticheskogo-pitaniya-naseleniya-bryanskoy-oblasti> [Accessed 17 Feb 2023]. (In Russian).
8. Romanovich IK, Bruk GYa, Barkovsky AN, Bratilova AA, Gromov AV, Kaduka MV. Substantiation of the concept of transfer to conditions of normal population activity of the settlements considered to be zones of radioactive contamination after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(1): 6-18. (In Russian).
9. Kaduka MV, Basalaeva LN, Bekyasheva TA, Ivanov SA, Salazkina NV, Stupina VV, et al. Radioactive contamination of mushrooms in the remote period after the Chernobyl accident. Collection of materials int. scientific-practical. conf. "Radiation and hygienic consequences and lessons from the accident at the Chernobyl nuclear power plant and the Fukushima-1 nuclear power plant", St. Petersburg, April 22–23, 2021. St. Petersburg: FBUN im. P.V. Ramzaeva of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2021. P. 111-115. (In Russian).
10. Zarubina NE, Trishin VV. Radionuclide contamination of higher fungi as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Collection of works int. conf. "Radioactivity after nuclear explosions and accidents", Moscow December 5-6, 2005. Moscow; 2005. Vol. 3. P. 109-118. (In Russian).
11. Perevolotsky AN, Gavrilov AV, Bulavik IM. Radioecology. Gomel; 1998. 99 p. (In Russian).
12. Panov AV, Marochkina EV, Ponomarenko VV. On the role of mushrooms in the internal dose formation to the population in the Chernobyl NPP accident affected areas. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 63-70. (In Russian).
13. Repin LV, Biblin AM, Vishnyakova NM, Sokolov NV, Davydov AA. Problems of risk communication: methodological approaches to the use of sociological data in planning of information work with the population on radiation safety issues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 50-57. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-50-57/. (In Russian).
14. The program of joint activities of Russia and Belarus within the framework of the Union state for the protection of the population and rehabilitation of the territories affected by the disaster at the Chernobyl nuclear power plant. Available from: <https://rusbelmeteo.ru/programs/chernobylunionprogram>. [Accessed 20 Feb 2023]. (In Russian).
15. Romanovich IK, Bazyukin A.B, Barkovsky AN, Biblin AM, Bratilova AA, Bruk GYa, et al., Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 1: Characteristics of the settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 22-36. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-22-36/. (In Russian).
16. Travnikova IG. Effectiveness of protective measures to reduce the internal dose of cesium radionuclides to residents of the radioactively contaminated zone: diss. ... cand. of biol. sciences: 14.00.07: protected 29.11.1990. Travnikova Irina Georgievna; Leningr. Research Institute of radiation hygiene. Leningrad; 1990. 176 p.

Received: April 21, 2023

For correspondence: Kseniya V. Varfolomeeva – Junior Researcher of the 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 Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: varfolomeeva_k@mail.ru)

Svetlana A. Zelentsova – Junior Researcher of the 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Victor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of the 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Repin V.S. Consumption structure of forest mushrooms by residents of contaminated districts of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 55-63. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-55-63

Сравнение эффективных доз персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных и в нестационарных условиях

С.Ю. Бажин, Е.Н. Шлеенкова, В.Ю. Богатырёва, В.А. Ильин

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

Официальные данные по дозам облучения дефектоскопистов не учитывают условия труда. В отчётных формах отсутствует разделение персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных условиях и в нестационарных условиях, что грубо усредняет значения эффективных доз в сторону занижения значений для персонала, работающего в нестационарных условиях. В настоящей работе выполнено сравнение собственных данных по дозам облучения дефектоскопистов. Показано, что разница в средних и медианных значениях годовых эффективных доз достигает 10 раз. При выполнении дефектоскопии в стационарных условиях персонал находится на достаточном расстоянии от источника ионизирующего излучения и хорошо экранирован инженерными средствами защиты, поэтому облучение персонала достаточно равномерно. В таких случаях достаточно 1 индивидуального термoluminesцентного дозиметра, расположенного на уровне груди, чтобы оценить значение эффективной дозы. При анализе собственной базы данных для персонала, проводящего дефектоскопию в стационарных условиях, было получено значение среднегодовой эффективной дозы, равное 0,87 мЗв (медиана — 0,88 мЗв, максимальное значение — 0,99 мЗв). При индивидуальном дозиметрическом контроле персонала, выполняющего дефектоскопию в нестационарных условиях с использованием переносных рентгеновских дефектоскопов, выявлены случаи нарушений при использовании индивидуальных дозиметров, что требует более жёстких мер по соблюдению существующих требований по обеспечению радиационной безопасности и правил эксплуатации индивидуальных дозиметров. Средняя годовая эффективная доза для дефектоскопистов, работающих с переносными рентгеновскими дефектоскопами, по результатам анализа собственных данных, равна 9,03 мЗв (медиана — 8,85 мЗв, максимальное значение — 12,37 мЗв).

Ключевые слова: индивидуальный дозиметрический контроль, дефектоскопия, средняя годовая эффективная доза, индивидуальный эквивалент дозы.

Введение

В основе дефектоскопии как метода неразрушающего контроля лежит закон ослабления веществом ионизирующего излучения: при облучении контролируемого объекта пучком рентгеновского или гамма-излучения формируется изображение его внутренней структуры, после чего оценивается качество контролируемого объекта. С каждым годом в мире увеличивается количество специалистов, занимающихся дефектоскопией [1]. По данным, представленным в ежегодных информационных сборниках о дозах облучения населения в Российской Федерации [2–8], в 2015–2021 гг. прослеживается плавное увеличение количества человек, занимающихся дефектоскопией – с 8105 человек в 2015 г. до 9636 человек в 2021 г. Динамика изменений средних годовых эффективных доз дефектоскопистов не имеет чёткой тенденции, и все значения доз не превышают 2 мЗв в год. Однако ежегодно среди наибольших максимальных зарегистрированных значений эффективных доз всегда присутству-

ют дозы дефектоскопистов. При этом практически все значения таких доз превышают среднегодовой предел эффективной дозы 20 мЗв, а в 2021 г. зарегистрировано значение дозы, равное 51 мЗв, превышающее годовой предел эффективной дозы 50 мЗв. Таким образом, можно заключить, что дефектоскописты могут быть отнесены к группе высокодозных профессий.

Несмотря на существенный вклад дефектоскопистов в структуру средних годовых эффективных доз и в количество случаев регистрации наибольших максимальных доз, особенности облучения работников данной профессии изучены недостаточно. В отечественной литературе практически не представлены данные по дозам облучения дефектоскопистов. Для дефектоскопистов не разработан нормативно-методический документ по организации и проведению индивидуального дозиметрического контроля (ИДК). Также ни в Российской Федерации, ни в зарубежных странах не существует единой системы контроля и учёта доз дефектоскопистов, учитывающей усло-

Бажин Степан Юрьевич

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

вия труда персонала, осуществляющего дефектоскопию в стационарных и нестационарных условиях. При этом существует понимание, что дефектоскопия в нестационарных условиях является существенно более высокодозной в сравнении с дефектоскопией, выполняемой в стационарных условиях [1]. Таким образом, при анализе среднегодовых эффективных доз происходит усреднение значений доз в сторону уменьшения значений для персонала, выполняющего дефектоскопию в нестационарных условиях. Решение данной проблемы требует изучения сценариев и условий облучения дефектоскопистов при различных видах дефектоскопии.

Разработка сценариев облучения на первом этапе работы требует получения исходных данных по дозам облучения дефектоскопистов с дифференцированной оценкой уровней облучения, в зависимости от различных дозообразующих факторов.

Цель исследования – оценка уровней облучения различных категорий персонала, занятого дефектоскопией, в зависимости от условий проведения дефектоскопии. Для этого были использованы результаты собственных измерений индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных и нестационарных условиях.

Материалы и методы

В качестве исходных данных при проведении настоящего исследования были использованы результаты собственных измерений квартальных индивидуальных эквивалентов доз $H_p(10)$ облучения персонала, занимающегося дефектоскопией. Операционная величина $H_p(10)$ является измеримой и была использована для определения нормируемой величины – эффективной дозы [9–13]. Измерения проводились методом термолюминесцентной дозиметрии (ТЛД) в соответствии с методикой измерения индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения $H_p(10)$. Были использованы индивидуальные дозиметры типа DTU-1 с детекторами ДТГ-4 (LiF: Mg, Ti). Считывание показаний производилось на термолюминесцентной дозиметрической установке Harshaw-2000D (США). Погрешность определения доз не превышала +/- 20%.

При проведении анализа персонал был разделен на группы в зависимости от условий труда:

1. Дефектоскописты, выполняющие дефектоскопию в стационарных условиях.
2. Дефектоскописты, выполняющие дефектоскопию в нестационарных условиях с использованием переносных рентгеновских дефектоскопов.

Время экспонирования индивидуальных дозиметров – 1 год. Периодичность замены дозиметров и проведения измерений – 1 квартал.

При проведении ИДК в вопросах выбора операционной величины, количества индивидуальных дозиметров, места их расположения, периодичности контроля и интерпретации результатов измерений мы руководство-

вались положениями МУ 2.6.1.3015–12 «Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций»¹. Таким образом, к различным специальностям и профессиональным отраслям были применены одинаковые подходы в проведении контроля. Данный подход не является вполне корректным, потому что не учитывает специфику работы различных категорий персонала при различных условиях работы. Однако, ввиду отсутствия нормативно-методического документа по организации ИДК дефектоскопистов, были использованы имеющиеся МУ 2.6.1.3015–12. Коэффициент перехода от индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ к эффективной дозе был равен 1. Для получения значений годовых эффективных доз были просуммированы значения квартальных доз для каждого отдельного специалиста.

Полученные данные были обработаны с использованием программного обеспечения Statistica 10.

В данной работе отсутствуют результаты измерений для дефектоскопистов, выполняющих дефектоскопию с использованием переносных радионуклидных дефектоскопов. Их технологический цикл работы включает различные дозообразующие операции при различной геометрии облучения: транспортировка, сборка, подготовка к работе, просвечивание объекта с безопасного расстояния. Среди описанных этапов только на последнем этапе облучение работника можно считать практически равномерным, в остальных случаях – резко неравномерное облучение при нахождении источника на уровне бедер и живота. Поэтому при существующем подходе к организации контроля велика вероятность недооценки эффективных доз с помощью одного индивидуального дозиметра, расположенного на уровне груди.

Результаты и обсуждение

В ходе работы проявилась одна из основных проблем в проведении ИДК персонала. В некоторых организациях собственные службы радиационного контроля не смогли привить персоналу культуру радиационной безопасности, в результате чего наблюдалось явное игнорирование необходимости использования индивидуальных дозиметров при выполнении работ с источниками ионизирующего излучения в нестационарных условиях. Из 5 выбранных в исследование организаций с персоналом, использующим переносные рентгеновские дефектоскопы, только в одной организации индивидуальные дозиметры использовались в соответствии с требованиями радиационного контроля, правилами эксплуатации и постоянно. На предварительном этапе анализа организации, персонал которых игнорировал эксплуатацию дозиметров, были исключены. В этих организациях значения доз персонала были близки или равны значениям, полученным в результате измерения фоновых дозиметров. Таким образом, анализ доз дефектоскопистов, выполняющих дефектоскопию в нестационарных условиях с использованием переносных генерирующих дефектоскопов, был выполнен для 1 организации, так как только правильное

¹ МУ 2.6.1.3015-12. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций. Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 3. С. 77–86. [Methodical guidelines 2.6.1.3015-12. "Organization and management of individual dosimetry of medical staff". Radiation Hygiene. 2012;5(3):77-86. (In Russ.)]

и регулярное ношение персоналом индивидуальных дозиметров позволяет правильно оценить дозы облучения персонала.

На рисунках 1 и 2 представлено распределение индивидуальных годовых эффективных доз персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных и нестационарных условиях.

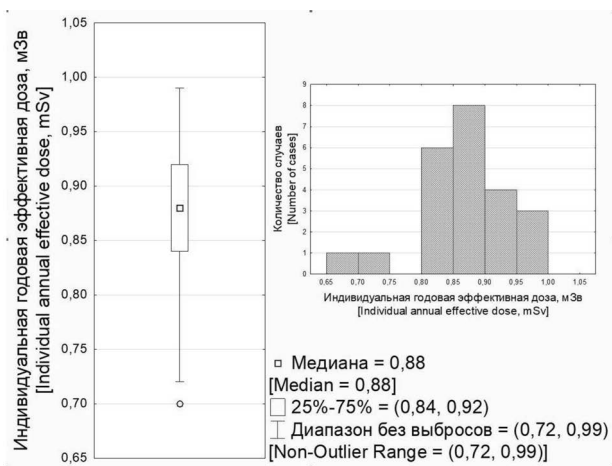


Рис. 1. Распределение индивидуальных годовых эффективных доз персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных условиях

[Fig. 1. Distribution of individual annual effective doses of personnel performing flaw detection in stationary conditions]

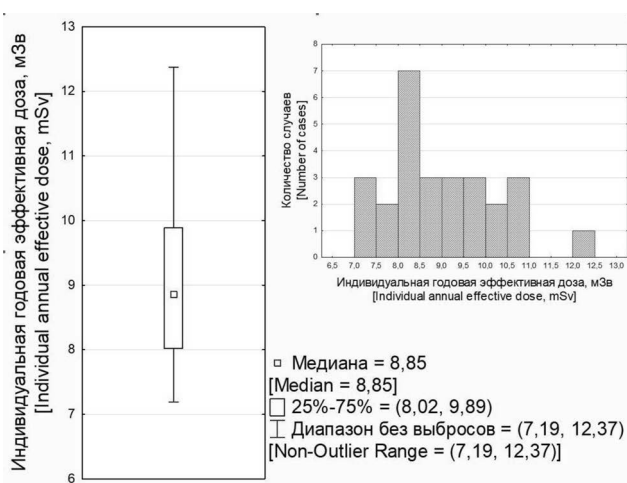


Рис. 2. Распределение индивидуальных годовых эффективных доз персонала, выполняющего дефектоскопию в нестационарных условиях с использованием переносного рентгеновского дефектоскопа

[Fig. 2. Distribution of individual annual effective doses of personnel performing site radiography using a portable roentgen flaw detector]

При анализе данных, представленных на рисунках 1 и 2, видно, что использование переносных рентгеновских дефектоскопов приводит к получению существенно более высоких значений доз облучения персонала. Средняя годовая эффективная доза для персонала, проводящего дефектоскопию в стационарных условиях, была равна 0,87 мЗв (медиана – 0,88 мЗв, максимальное значение – 0,99 мЗв), для дефектоскопистов, работающих

с переносными рентгеновскими дефектоскопами, средняя годовая эффективная доза была равна 9,03 мЗв (медиана – 8,85 мЗв, максимальное значение – 12,37 мЗв). Таким образом, разница в средних и медианных значениях достигает 10 раз.

Дефектоскопия в стационарных условиях проводится в специализированных защитных боксах при нахождении персонала в комнатах управления. При таких условиях работы обеспечен необходимый уровень радиационной безопасности. Дефектоскопия в стационарных условиях производится на достаточном расстоянии от источника ионизирующего излучения (ИИИ), и облучение всего тела персонала достаточно равномерно, поэтому для оценки эффективной дозы достаточно 1 индивидуального дозиметра, расположенного на поверхности тела в районе груди. Данное различие в уровнях облучения хорошо согласуется с положениями научного отчёта НКДАР ООН [1] и наглядно представлено на рисунке 3.

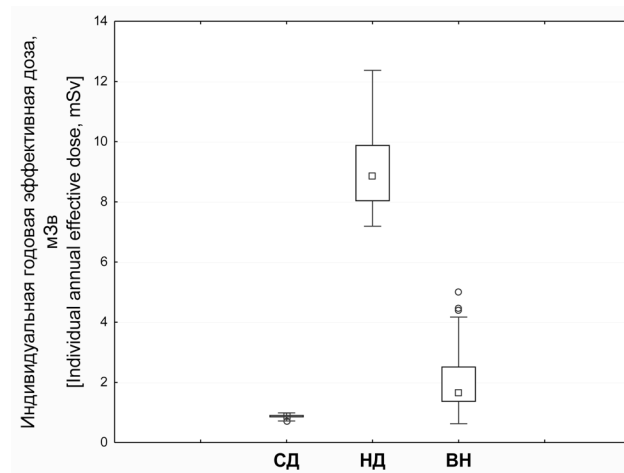


Рис. 3. Сравнение средних индивидуальных годовых эффективных доз специалистов, занимающихся дефектоскопией в стационарных (СД) и в нестационарных (НД) условиях, а также специалистов из исключённых при валидации организаций (ВН)

[Fig. 3. Comparison of average individual annual effective doses of specialists involved in flaw detection in stationary (CD) and non-stationary (ND) conditions, as well as specialists from organizations excluded during validation (BH)]

На рисунке 3 также указаны средние годовые эффективные дозы персонала организаций, не прошедших валидацию (ВН) и включённых в статистический анализ отдельно. Как было отмечено, персонал 4 организаций из 5, включённых в исследование, по косвенным признакам не использовал индивидуальные дозиметры при проведении работ с ИИИ. Таким образом, наглядно представлена недооценка доз персонала в организациях, когда индивидуальные дозиметры при работе не использованы. Также наблюдается существенное отличие в уровнях облучения персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных условиях, и персонала, использующего в работе переносные рентгеновские дефектоскопы.

Закключение

Отсутствие отдельного представления доз персонала, осуществляющего дефектоскопию в стационарных и нестационарных условиях, приводит к усреднению доз

в сторону уменьшения значений для персонала, выполняющего дефектоскопию в нестационарных условиях.

При проведении ИДК выявлены достоверные различия между уровнями внешнего облучения персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных условиях и нестационарных условиях с использованием переносных рентгеновских дефектоскопов (средняя годовая эффективная доза для персонала, проводящего дефектоскопию в стационарных условиях, была равна 0,87 мЗв, медиана – 0,88 мЗв, максимальное значение – 0,99 мЗв, для дефектоскопистов, работающих с переносными рентгеновскими дефектоскопами, средняя годовая эффективная доза была равна 9,03 мЗв, медиана – 8,85 мЗв, максимальное значение – 12,37 мЗв). Радиационная безопасность персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных условиях, обеспечена должным образом. При проведении работ персонал находится на достаточном расстоянии от источника, поэтому облучение достаточно равномерно. При таких условиях работы достаточно 1 индивидуального термолюминесцентного дозиметра, чтобы по его показаниям оценить значение эффективной дозы. Расположение этого дозиметра – на уровне груди слева. Эффективные дозы такого персонала не высоки.

ИДК персонала, выполняющего дефектоскопию в нестационарных условиях с использованием переносных рентгеновских дефектоскопов, требует более жёстких мер по соблюдению существующих правил эксплуатации индивидуальных дозиметров, чтобы исключить случаи пренебрежения ими персонала. Эффективные дозы данной категории работников на порядок выше и существенны.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Бажин С.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.

Шлеенкова Е.Н. провела литературный поиск, выполнила измерения индивидуальных эквивалентов доз, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Богатырёва В.Ю. провела литературный поиск и выполнила группировку и структурирование полученных данных.

Ильин В.А. осуществил подготовку средств измерения и выполнил градуировку детекторов.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Volume IV. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly and Scientific Annex A. UNSCEAR 2020/2021 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York; 2022.
2. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.Н. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информационный сборник. СПб., 2016. 72 с.
3. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб., 2017. 78 с.
4. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информационный сборник. СПб., 2018. 72 с.
5. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб., 2019. 72 с.
6. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб., 2020. 70 с.
7. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: информационный сборник. СПб., 2021. 83 с.
8. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году: Справочник. СПб., 2022. 72 с.
9. ICRU Report 43: Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2 // ICRU. 1988. Volume os-22, Issue 2. P. 51.
10. ICRU Report 51: Quantities and units in radiation protection dosimetry // ICRU. 1993. Volume os-26, Issue 2. P. 19.
11. ICRU Report 57: Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation // ICRU. 1998. Volume os-29, Issue 2. P. 137.
12. ICRU Report 60: Fundamental quantities and units for ionizing radiation // ICRU. 1998. Volume os-31, Issue 1. P. 24.
13. ICRU Report 66: Determination of Operational Dose Equivalent Quantities For Neutrons // Journal of the ICRU. 2001. Vol. 1, Issue 3. P. 94.

Поступила: 18.09.2023 г.

Бажин Степан Юрьевич – заведующий лабораторией радиационного контроля, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: s.bazhin@niirg.ru

Шлеенкова Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Богатырёва Виктория Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Ильин Владимир Александрович – техник-исследователь лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: 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

Comparison of effective doses for personnel performing flaw detection in stationary conditions and *in situ*

Stepan Yu. Bazhin, Ekaterina N. Shleenkova, Victoria Yu. Bogatyreva, Vladimir A. Ilyin

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

Official data on radiation doses for flaw detectors do not take into account working conditions. In the reporting forms, there is no division between personnel performing flaw detection in stationary conditions and in situ, which roughly averages the values of effective doses towards underestimating the values for personnel working in site radiography. In this work, comparison of our own data on radiation doses of flaw detectors was performed. It has been shown that the difference in the mean and median values of effective doses reaches 10 times. When performing flaw detection in stationary conditions, the personnel are at a sufficient distance from the source of ionizing radiation and are well shielded by engineering protective equipment, so the exposure is fairly uniform. In such cases, one individual thermoluminescent dosimeter located at chest level is sufficient to estimate the effective dose. The average annual effective dose for personnel conducting flaw detection in stationary conditions is 0.87 mSv (median – 0.88 mSv, maximum value – 0.99 mSv). During individual radiation monitoring of personnel performing flaw detection in situ using portable roentgen flaw detectors, cases of neglect in the use of individual dosimeters were identified, which requires more stringent measures to comply with existing requirements for ensuring radiation safety and operating rules for individual dosimeters. The average annual effective dose for flaw detectors working with portable roentgen flaw detectors is 9.03 mSv (median – 8.85 mSv, maximum value – 12.37 mSv).

Key words: individual dosimetric monitoring, flaw detection, average annual effective dose, individual dose equivalent.

Personal contribution of the authors

Bazhin S.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.

Shleenkova E.N. – conducted a literature search, performed measurements of individual dose equivalents, and edited an intermediate version of the manuscript.

Bogatyreva V.Yu. – conducted a literature search and grouped and structured the obtained data.

Ilyin V.A. – carried out the preparation of measuring instruments and calibrated the detectors.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflicts of interest when conducting the study and preparing this article.

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Volume IV. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly and Scientific Annex A. UNSCEAR 2020/2021 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York; 2022.
2. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Repin LV, Romanovich IK, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2015: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2016. 72 p. (In Russian).
3. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Bruk GYa, Vorobiev BF, Kormanovskaya TA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2016: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2017. 78 p. (In Russian).

Stepan Yu. Bazhin

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

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

4. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2017: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2018. 72 p. (In Russian).
5. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2018: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2019. 72 p. (In Russian).
6. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2019: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2020. 70 p. (In Russian).
7. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2020: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2021. 83 p. (In Russian).
8. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA et al. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2021: A Handbook. Saint-Petersburg: NIIRG; 2022. 72 p. (In Russian)
9. ICRU Report 43: Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. *ICRU*. 1988; os-22(2): 51.
10. ICRU Report 51: Quantities and units in radiation protection dosimetry. *ICRU*. 1993; os-26(2): 19.
11. ICRU Report 57: Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *ICRU*. 1998; os-29(2): 137.
12. ICRU Report 60: Fundamental quantities and units for ionizing radiation. *ICRU*: 1998; os-31(1): 24.
13. ICRU Report 66: Determination of Operational Dose Equivalent Quantities For Neutrons. *Journal of the ICRU*. 2001; 1(3): 94.

Received: September 18, 2023

For correspondence: 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 Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: s.bazhin@niirg.ru)

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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Vladimir A. Ilyin – Technician-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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Bogatyreva V.Yu., Ilyin V.A. Comparison of effective doses for personnel performing flaw detection in stationary conditions and *in situ*. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 64-69. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-64-69

Влияние добывающих и топливно-энергетических предприятий на радиационный фон территорий

Р.Д. Перевошиков¹, А.А. Перевошикова^{1,2}, Е.А. Меньшикова¹

¹ Естественнаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

² Факультет химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

В настоящем обзоре представлена информация о радиационном фоне территорий в зоне влияния добывающих и топливно-энергетических предприятий. С развитием горнодобывающей деятельности происходит увеличение поступления естественных радионуклидов из недр. Многие радионуклиды и металлы, которые переносятся на значительные расстояния от предприятий потоками воздуха, поверхностными и грунтовыми водами, накапливаются в почвах, грунтах и донных отложениях прилегающих территорий. В данной работе представлен обзор удельной активности естественных радионуклидов для территорий разработки калийных, фосфатных, углеводородных и угольных месторождений. Разрабатываемые калийные руды являются источником поступления в окружающую среду ^{40}K . Согласно полученным результатам, миграция исследованных радионуклидов ограничивается зоной 2 км. Только незначительная часть исследованных проб (8%) превышает среднемировые активности ^{40}K для почв. В донных отложениях средняя активность ^{40}K не превышает значений по другим территориям с техногенным влиянием. Ежегодно во всем мире потребляется более 30 млн т фосфорных удобрений, применение которых увеличивает производство сельскохозяйственных культур. Удельная активность урана в фосфатах колеблется от 37 до 4900 Бк/кг для ^{238}U и от 100 до 10 000 Бк/кг для ^{226}Ra . Величину радиоактивности нефти, газа и пластовых вод оценивают через определение активности ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . Согласно опубликованным данным, вблизи устьев скважин, в местах скопления нефтешлямов, в районе факелов на нефтяных и газовых предприятиях наблюдается повышенный радиационный фон в результате выноса на поверхность ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr и др. Источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды являются и угледобывающие предприятия, на которых вместе с углём из недр поступает большое количество естественных радионуклидов (^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{232}Th). В работе представлена средняя активность естественных радионуклидов в углях некоторых угольных месторождений мира. По мере развития добывающего и топливно-энергетического комплексов происходит активный вынос на дневную поверхность вместе с минеральным сырьем естественных радионуклидов ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{238}U , что приводит к возрастанию радиационного фона и требует внимания к этим изотопам в программах мониторинга окружающей среды.

Ключевые слова: естественные радионуклиды, добывающие предприятия, топливно-энергетические предприятия, мониторинг окружающей среды.

Введение

С XX в. технический прогресс сопровождался извлечением из недр огромных масс минерального сырья (нефти, олова, свинца, серебра, цинка, ртути, сурьмы, алмазов и др.) в количестве свыше 90–95% от общей добычи за всю историю человечества. Добыча природного газа, бокситов, руд никеля, молибдена, вольфрама и многих других видов минерального сырья была начата в промышленных масштабах лишь в XX столетии. Особенно стремительное изъятие запасов всех видов минерального сырья произошло в мире, в том числе на территории бывшего СССР, в период 1961–1980-х гг. [1].

Активное развитие атомной энергетики, для которой используется уран, берет свое начало со второй половины XX в. По состоянию на октябрь 2021 г. в мире действовало 437 коммерческих атомных реакторов в 32 странах с общей мощностью 378,04 ГВт, в том числе в России 37 реакторов общей мощностью 29,5 ГВт [2]. Ожидается, что мировой спрос на энергию вырастет более чем на 50% к 2040 г. Масштабы и последствия извлечения такого объема природных ресурсов становятся предметом многочисленных исследований во всем мире [3], поскольку в результате активного развития горнопромышленной и промышленной отрасли возникают процессы, которые

Перевошиков Роман Дмитриевич

Естественнаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета

Адрес для переписки: 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, 4; E-mail: rperevoshnikov@bk.ru

негативно влияют на окружающую среду и здоровье населения. В частности, по мере развития горнодобывающей деятельности вместе с минеральным сырьем из недр происходит поступление естественных радионуклидов [4, 5].

Естественный радиоактивный фон территории обусловлен космическим излучением, а также наличием радиоактивных элементов в земной коре, гидросфере и атмосфере. Природные радионуклиды присутствуют в различных объектах окружающей среды – воде, почвах, донных отложениях и горных породах. Они изначально входят в их химический состав, в результате чего формируется радиоактивный фон для живых организмов. Среди радиоактивных изотопов естественного происхождения, которые присутствуют в различной специфической активности в окружающей среде, наиболее распространенными и важными с экологической позиции являются ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{40}K [6–8].

Помимо природных источников радионуклидов, на долю которых приходится около 85% от годового ионизирующего излучения, получаемого населением (WNA, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM), 2014), воздействие на окружающую среду оказывает и антропогенная деятельность, такая как ядерные аварии и испытания, добыча полезных ископаемых, промышленная деятельность и агрохимикаты, используемые в сельском хозяйстве [9].

Горнодобывающая деятельность способствует увеличению радиоактивного фона территорий, поскольку она ускоряет миграцию элементов из минералов и горных пород в окружающую среду [10]. Естественные радионуклиды (ЕРН), особенно образующиеся в результате распада уран-ториевого ряда, могут со временем выщелачиваться из отходов горной добычи и поступать в водные объекты, почвенный покров прилегающих территорий, представлять угрозу для источников питьевого водоснабжения [11]. Другими потенциальными путями воздействия являются процессы рассеивания пыли и биоаккумуляция радиоактивных элементов через пищевую цепь [7, 8, 9, 12].

Радиоактивный фон от первичных радионуклидов, таких как ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K , в почве, воде, горных породах, составляет около 80% от общей дозы радиации, получаемой человеком за год [13]. При этом главную роль в формировании радиоактивного фона окружающей среды играет почва, поскольку она выступает одновременно объектом аккумуляции и средством транспортировки радионуклидов в биологические системы.

Почва является компонентом экосистемы и состоит из различных органических и минеральных веществ. Это гетерогенная, дисперсная и пористая система, что делает ее поглотителем различных веществ и соединений [14]. Этим объясняется накопление радиоактивных элементов в почве. Содержание радионуклидов в почве в основном зависит от совокупности следующих факторов – генетического типа ландшафта и его геоморфологической характеристики, производственной мощности горнодобывающего предприятия, климатических и орографических особенностей территории, которые определяют неравномерное распределение ЕРН по земной поверхности [15, 16, 17].

Наибольшую нагрузку на окружающую среду и дозовую нагрузку на человека при разработке нерадиоак-

тивного сырья оказывают объекты добычи, переработки и использования фосфоритов, калийных руд, угля, редкоземельных руд, в том числе титан-урановых россыпей и нефтяных месторождений.

Рудничная пыль и воды, пыль и аэрозоли хвостохранилищ обогатительных фабрик и гидрометаллургических заводов выносят в окружающую среду многие радионуклиды и металлы, которые переносятся поверхностными и грунтовыми водами, потоками воздуха на значительные расстояния, формируя радиоактивный фон прилегающих территорий [18].

Радиоактивное загрязнение природной среды может быть связано с присутствием естественных радиоактивных элементов (U, Th, K) и продуктов их распада в технических, минеральных водах, рассолах нефтегазовых районов. Разливы таких вод приводят к изменению радиоактивного фона больших площадей, на которых экспозиционная доза гамма-излучения может превышать 8000 мкР/ч [19]. Радиоактивная обстановка в районах добычи углеводородного сырья еще более осложняется в тех случаях, когда в целях повышения нефтеотдачи в пределах месторождений проводились подземные ядерные взрывы.

При освоении урановых месторождений в окружающую среду поступают радионуклиды 3 радиоактивных семейств – ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th , но общая радиоактивность в основном обусловлена семейством ^{238}U . Отличительной особенностью уранодобывающей промышленности от любой другой горнодобывающей отрасли является повышенная радиоактивность ее отходов. Твердые отходы урановых рудников и карьеров представляют собой пустые породы (с фоновой или близкой к ней радиоактивностью), забалансовые урановые руды, отвалы хвостов радиометрической сортировки руд, неиспользуемые попутно добываемые полезные ископаемые, хвосты кучного выщелачивания [18].

К другим предприятиям, на которых формируются отходы с повышенным содержанием ЕРН, относятся предприятия, в той или иной степени связанные с обращением с минеральным сырьем, – горнодобывающие, нефтегазодобывающие, обогатительные и перерабатывающие, использующие минеральные природные воды. Отходы предприятий каждой отрасли имеют свои характерные особенности, которые определяются, наряду с удельной активностью ЕРН в добываемых и/или используемых материалах, технологическими особенностями производства и его мощностью. Радиационная опасность производственных отходов для населения и окружающей среды определяется их физико-химическими характеристиками – радионуклидным составом и удельной активностью ЕРН, интенсивностью радонотделения, степенью выщелачивания, интенсивностью и возможностью миграции радионуклидов из мест хранения отходов.

В научной литературе существует множество результатов частных исследований по радиоактивной обстановке на месторождениях, но, несмотря на глубокую изученность влияния различных месторождений на окружающую среду, до сих пор редкостью является информация о радиоактивной обстановке на этих территориях. В данной работе представлены эти сведения для углеводородных, фосфатных, калийных и угольных месторождений.

Цель исследования – обобщение и анализ воздействия на радиационную обстановку производственной деятельности добывающих и топливно-энергетических предприятий. В данной статье представлен анализ результатов более 100 опубликованных работ.

Естественная радиоактивность при добыче калийных солей

Горнодобывающая деятельность влечет за собой различные экологические последствия [20, 21], в том числе она рассматривается как один из источников поступления ЕРН в окружающую среду. Сырьем для производства калийных удобрений является калийная руда (рис. 1). В настоящее время в мировой практике добыча калийных и калийно-магниевых солей ведется подземным горным (шахтным) способом на 69 объектах, которые производят 85% общего объема калийных удобрений [22].

Удобрения являются ключевым фактором в поддержании мирового сельскохозяйственного производства для обеспечения населения продуктами питания. Удобрения поставляют питательные вещества, необходимые растениям для нормального роста, развития и здоровья. Для роста растений в больших количествах требуются 3 основных питательных вещества: азот, фосфор и калий [23].

Крупнейшие в мире месторождения калийных солей являются Саскачеванское (Канада), Верхнекамское (Россия) и Старобинское (Республика Беларусь) [20]. Значительные запасы калийных солей расположены в США, Германии, Англии и Китае [24]. Новые месторождения калийных солей были открыты в Центральной и Юго-Восточной Азии, Южной Америке, Западной и Восточной Африке, планируются к освоению ранее не разрабатывавшиеся эвапоритовые месторождения в Северной Америке [20, 25].

Разработка крупных калийных месторождений в мире началась с открытия Верхнекамского месторождения (Соликамский бассейн) в 1925 г. и Старобинского месторождения (Припятский калиеносный бассейн) в 1949 г. В настоящее время разработка Верхнекамского калийно-

го месторождения осуществляется в России тремя компаниями: ПАО «Уралкалий», «ЕвроХим», ПАО «Акрон», а Старобинского месторождения – ОАО «Беларуськалий». При этом большие перспективы развития калийной отрасли остаются в странах Средней Азии: Туркменистан – Гарлыкское месторождение, Узбекистан – Тюбегатанское месторождение, Казахстан – Жилинское калийно-полигалитовое месторождение и горно-калийное месторождение Сатимолы [20].

На сегодняшний день в России насчитывается 9 калийных месторождений (Верхнекамское, Непское, Гремячинское, Ново-Гремячинское, Якшинское, Западно-Петриковское, Восточно-Петриковское, Нивенское и Северо-Красноборское) [20, 22] (рис. 2).

Разрабатываемые калийные руды являются источником поступления в окружающую среду ^{40}K . Исследования керна разведочной скважины на Верхнекамском месторождении (табл. 1) демонстрируют более высокие значения активности ^{40}K в продуктивных калийных пластах, что обусловлено их минеральным составом – присутствием калийсодержащих минералов, прежде всего сильвина (KCl). Для рассматриваемого месторождения наиболее высокие значения активности характерны для пестрых сильвинитов (до 4967 Бк/кг), что существенно выше активности ^{40}K для обобщенных данных по осадочным породам и континентальной земной коре.

Нормирование суммарной удельной активности ЕРН с учетом СанПиН 2.6.1.2800-10 (приложение 7) для исследуемых образцов (см. табл. 1) проведено по расчетной величине эффективной удельной активности природных радионуклидов $A_{\text{эфф}}$, которая определяется характеристикой внешнего гамма-излучения материальных сред (Бк/кг). Формула для ее расчета имеет вид:

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,3A_{\text{Tn}} + 0,09A_{\text{K}},$$

где A_{Ra} и A_{Tn} – удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th (Бк/кг), находящиеся в равновесии с остальными членами рядов ^{238}U и ^{232}Th , A_{K} – удельная активность ^{40}K (Бк/кг).



Рис. 1. Солеотвал и калийная залежь, Верхнекамское месторождение (Пермский край, Россия)
[Fig 1. Salt dump and potash deposit, Verkhnekamskoe mine (Perm Region, Russia)]

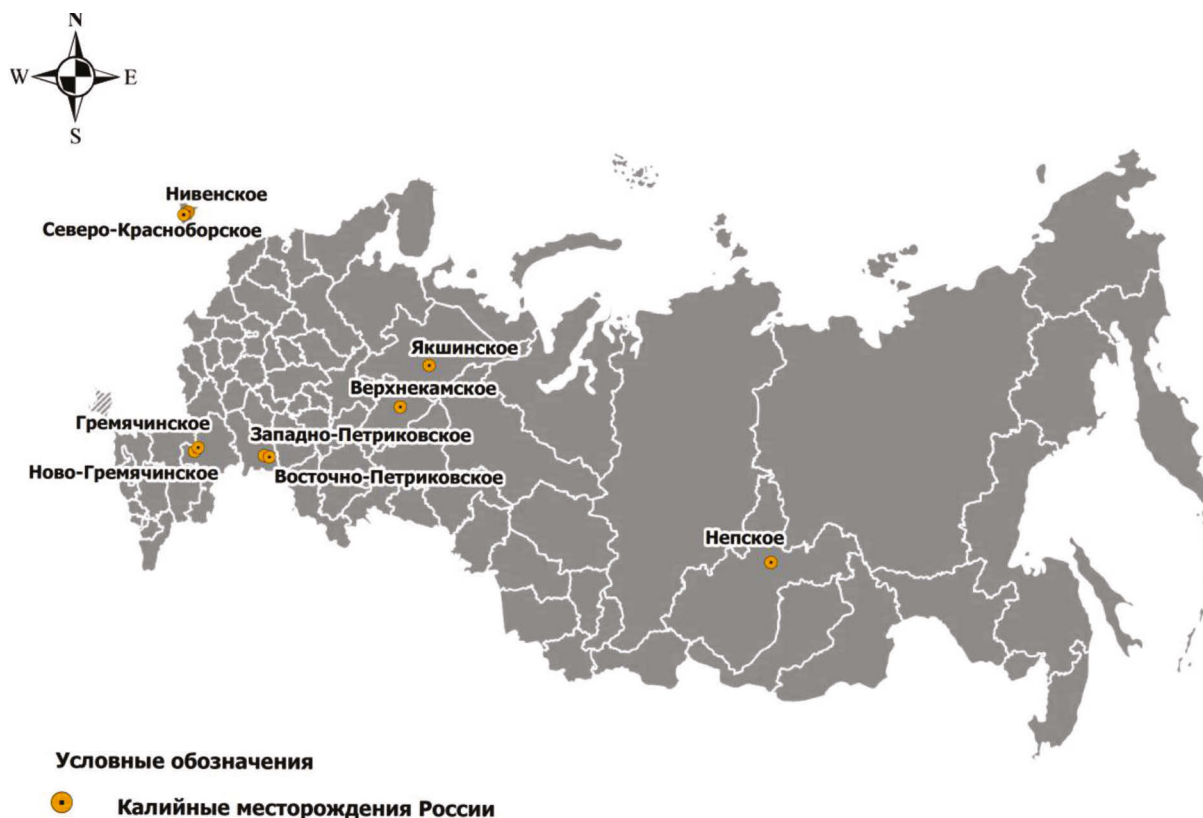


Рис. 2. Калийные месторождения России
[Fig. 2. Potash deposits in Russia]

Таблица 1

Удельная активность природных радионуклидов в породах разведочной скважины и измельченной руде

[Table 1]

Specific activity of natural radionuclides in exploratory borehole rocks and milled ore

Породы (интервал отбора, м) [Rock (Sampling interval, m)]	Активность, Бк/кг [Activity concentration (Bq/kg)]			
	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	$A_{\text{эфф}} [A_{\text{eff}}]$
Суглинок (3,5–4,0) [Loam (3,5–4,0)]	333±55	15,3±5	17,3±3	67,16±14,45
Мергель (13,0–13,5) [Mergel (13,0–13,5)]	177±37	7,5±4	4,9±3	30,58±11,53
Мергель глинистый (26,2–26,4) [Clay Mergel (26,2–26,4)]	382±60	12,9±5	7,3±3	58,45±14,90
Мергель глинистый (29,4–29,5) [Clay Mergel (29,4–29,5)]	346±56	17,3±5	7±3	60,63±14,54
Мергель глинистый (151,9–152,1) [Clay Mergel (151,9–152,1)]	359±57	20,9±5	4,6±3	64,08±14,63
Мергель-гипсовая порода (173,4–173,8) [Mergel-gypsum rock (173,4–173,8)]	927±195	22,2±6,26	6,26±4,89	118,55±30,58
Каменная соль (197,0–197,3) [Rock salt (197,0–197,3)]	3±0	3,2±3	3±0	7,43±3,9
Карналлит (226,7–227,0) [Carnallite (226,7–227,0)]	2896±330	19,8±5	3±0	289,38±36,2
Карналлит (245,5–245,9) [Carnallite (245,5–245,9)]	3031±340	17,8±5	3±0	298,93±37,1

Породы (интервал отбора, м) [Rock (Sampling interval, m)]	Активность, Бк/кг [Activity concentration (Bq/kg)]			
	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	$A_{\text{эфф}} [A_{\text{eff}}]$
Карналлит (272,8–273,2) [Carnallite (272,8–273,2)]	2824±320	16,7±5	3±0	278,87±35,3
Пестрый сильвинит (282,6–283,0) [Variegated sylvinit (282,6–283,0)]	4967±540	38,3±8	3±0	499,82±59,00
Полосчатый сильвинит (284,9–285,4) [Striated sylvinit (284,9–285,4)]	3393±380	41±8	3±0	361,67±44,60
Красный сильвинит (296,5–297,1) [Red sylvinit (296,5–297,1)]	2055±240	16,4±5	3±0	209,27±28,10
Полосчатый сильвинит (304,0–304,55) [Striated sylvinit (304,0–304,55)]	4542±470	24,9±6	3±0	418,05±50,10
Каменная соль (348,3–348,9) [Rock salt (348,3–348,9)]	3±0	3±0	3±0	7,17±0,00
Измельченная руда [Crushed ore]				
Сильвинит молотый [Sylvinit ground]	4510 ± 730	<8	14,5 ± 4,2	398 ± 66
Сильвинит молотый [Sylvinit ground]	4612 ± 742	<8	<8	418 ± 67
Галитовые отходы [Galite waste]	283 ± 70	<8	<8	24 ± 6
Галитовые отходы [Galite waste]	297 ± 66	<8	<8	27 ± 7
Обобщенные данные по солям Шахты Кхевера, Пакистан [27] [Generalised data on salts The Khewera Mines, Pakistan]	36±20	–	–	–
Обобщенные данные по осадочным породам [6] Осадочные породы Континентальная земная кора [Generalised data on sedimentary rocks Sedimentary rocks Continental crust]	<300–900 850	<8–50 44	– –	– –

Эффективная удельная активность всех исследованных образцов калийных солей не превышает 740 Бк/кг [26].

В процессе миграции естественные радионуклиды поступают в водные объекты, аккумулируются в почвах, грунтах и донных отложениях. Почвенный покров является важнейшим компонентом природной среды, в котором сосредоточено 95–98% активности загрязняющих радионуклидов. В связи с тем, что природная активность ЕРН с глубиной меняется незначительно, анализ именно этого слоя является основным при изучении радиоактивного загрязнения почв и грунтов [15, 28].

Изучение активности ЕРН в депонирующих средах на Верхнекамском месторождении калийных солей [15, 26, 29] показало, что миграция ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ограничивается зоной 2 км. Только незначительная часть исследованных проб (8%) превышает среднемировые активности ^{40}K для почв. В донных отложениях средняя активность ^{40}K не превышает значений по другим территориям с техногенным влиянием. Активность ^{226}Ra и ^{232}Th в исследованных пробах значительно ниже среднемировых значений [29].

Таким образом, несмотря на высокую активность ^{40}K в разрабатываемых калийных рудах, подземная разра-

ботка месторождений калийных солей не оказывает влияния на радиоактивную обстановку на территориях.

Естественная радиоактивность при добыче фосфатов

Месторождения фосфатов считаются одним из самых важных невозобновляемых ресурсов в мире. Минералы на основе фосфора в основном используются в производстве удобрений, моющих средств, продуктов питания и напитков, а также при обработке металлов (антикоррозионные покрытия) [3].

Общемировая добыча фосфатов в 2021 г. составила 220 млн т. Лидерами по добыче являются Китай, Марокко, США и Россия (рис. 3). Во всем мире более 85% мирового производства фосфатной руды добывается из осадочных месторождений [3]. На рисунке 4 представлено хвостохранилище фосфатного рудника в штате Флорида.

Радиоактивность фосфатных месторождений исследуется с начала 1900-х гг. В то время уже было известно, что месторождения фосфатов обычно характеризуются высокими концентрациями радионуклидов [32]. Фосфатная руда содержит природные радионуклиды,



Рис. 3. Регионы добычи фосфатов
[Fig 3. Phosphate mining regions]



Рис. 4. Хвостохранилище фосфатного рудника, регион Южной прибрежной равнины (штат Флорида, США), июль 2006 г. [30]
[Fig4. Phosphate mine tailings pond, South Coastal Plain Region (Florida), July 2006]

такие как уран, торий и продукты их радиоактивного распада и ^{40}K [3, 33].

Большинство радионуклидов, присутствующих в фосфатных породах, относятся к природным рядам ^{238}U и ^{232}Th , а также ^{40}K . При радиоактивном распаде ^{40}K , ^{238}U ,

^{232}Th и дочерних продуктов их распада испускается альфа-, бета- и гамма-излучение.

В мире имеется множество публикаций, посвященных радиоактивности фосфатных руд, удобрений, отходов [34–36]. По сравнению с добычей и переработкой урановых руд, фосфоритная руда содержит сравнительно невысокие концентрации ЕРН семейств ^{238}U и ^{232}Th . Активность ^{226}Ra и ^{238}U в фосфатных рудах изменяется в очень широком интервале (табл. 2). Она может достигать значений по ^{226}Ra и ^{238}U 4800 Бк/кг (США, штат Южная Каролина). Также высокая активность ^{226}Ra и ^{238}U наблюдается в образцах фосфатной руды в Бразилии (штат Олинда), где составляет 3550 Бк/кг и 3400 Бк/кг соответственно [37]. Также, например, на территории фосфатных месторождений Блед Эль-Хадба (Северо-Восточный Алжир) основная активность приходится на ряд ^{238}U [3].

В районе Кусейр-Сафага (Центрально-Восточная пустыня, Египет), где расположены фосфатные рудники, средняя удельная активность ^{238}U составляет 1766 Бк/кг, что в 53 раза превышает среднемировое значение (33 Бк/кг) [38]. Согласно опубликованным данным [39], безопасная утилизация фосфатного шлама, образующегося при добыче фосфатной руды, является серьезной проблемой, поскольку происходит облучение шахтеров и населения, проживающего в этом горнодобывающем районе.

Таблица 2

Средняя удельная активность ЕРН (Бк/кг) в фосфатах различных месторождений мира [40]

[Table 2]

Average specific activity of natural radionuclides (Bq/kg) in phosphates from different locations worldwide]

Регион [Region]	ЕРН [Natural radionuclides]		
	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th
Флорида (США) [Florida (USA)]	1500	1600	16
Южная Каролина (США) [South Carolina (USA)]	4800	4800	78
Марокко [Morocco]	1700	1700	30
Кольский полуостров (Россия) [Kola Peninsula (Russia)]	90	40	90
Китай [China]	150	150	25

Фосфатные породы являются исходным материалом для производства всех фосфатных продуктов и основным источником фосфора для удобрений.

Ежегодно во всем мире потребляется более 30 млн т фосфорных удобрений, применение которых увеличивает производство сельскохозяйственных культур [41]. Согласно опубликованным данным [42], возможным негативным эффектом использования этих удобрений является загрязнение обрабатываемых земель некоторыми естественными радионуклидами.

В почвах сельскохозяйственных угодий России за 2016 г. средние активности ^{226}Ra , ^{232}Th (^{228}Ra) и ^{40}K составили $21,6 \pm 0,3$ Бк/кг, $29,2 \pm 0,3$ Бк/кг, 490 ± 5 Бк/кг соответственно, что входит в типичный диапазон концентраций ЕРН в почве, характерный для планеты в целом. Однако средняя активность ^{226}Ra в почвах сельскохозяйственных угодий России немного ниже, активности ^{232}Th и ^{40}K – несколько выше среднемировых значений [37].

Таким образом, добыча фосфатных руд приводит к повышению средних концентраций ^{238}U и ^{232}Th в почвах горнодобывающих районов, что в дальнейшем может привести к формированию повышенного радиационного фона территории. Несмотря на высокую активность ЕРН в разрабатываемых фосфатных породах, применение фосфорных удобрений не оказывает существенного влияния на удельную активность радионуклидов в сельскохозяйственных землях.

Естественная радиоактивность при добыче углеводородов

Разработка нефтяных и газовых месторождений часто связана с химическим и радиоактивным загрязнением природной среды. При добыче углеводородов основными источниками воздействия являются промышленные объекты, трубопроводы, транспортные средства и хозяйственно-бытовая деятельность на территории нефтепромыслов [43].

Нефть, газ и пластовые воды за счет контакта с вмещающими породами, процессов растворения и обмена обогащены различными химическими соединениями, тяжелыми металлами и ЕРН. Величину радиоактивности нефти, газа и пластовых вод оценивают через определение содержания ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . Согласно опубликованным данным, вблизи устьев скважин, в местах скопления нефтешламов, в районе факелов на нефтяных и газовых предприятиях наблюдается повышенный радиационный фон в результате выноса на дневную поверхность целого ряда естественных и антропогенных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr и др.).

В настоящее время проблема радиоактивного загрязнения окружающей среды в связи с добычей и переработкой углеводородного сырья стала достоянием гласности и широко обсуждается в научно-технических изданиях России, США, Китая и ряда других стран [44, 45, 46, 47] (рис. 5). Так, согласно данным 1990 г. [47], в США уже на тот период накопилось свыше 10 млн т радиоактивных шламов и солей.

Основная причина появления радия в пластовых флюидах нефтяных месторождений – выщелачивание и ионный изотопный обмен. По различным оценкам, в России масса радиоактивных шламов пластовых вод месторождений углеводородов составляет от 50 до 200 млн т [44].



Рис. 5. Добыча нефти в мире
[Fig5. Global oil production]

Впервые повышенные концентрации ЕРН на промышленном оборудовании нефтедобывающих производств – на фильтрах, сепараторах, отстойниках, внутренней поверхности труб и конструкций, которые используются в процессе добычи, были обнаружены в 1970–1980-е гг. сначала в США, затем в СССР (в Баку), в 1990-е гг. на территории Республики Татарстан [44, 48]. Активность ЕРН в отложениях на стенках промыслового оборудования оказалась выше активности ЕРН в шламах. В США накопившиеся в результате извлечения нефти отложения отнесены к отходам и классифицированы как технологически обогащенный природный радиоактивный материал – TENORM [49]. Накопления таких отложений на оборудовании могут стать источниками облучения персонала. Основная масса отложений скапливается на электроцентробежных насосах, насосно-компрессорных трубах, поверхностных резервуарах и оборудовании первичной подготовки нефти [50]. Радиобарит (Ba , Ra) SO_4 , с незначительными примесями других солей, и природные радионуклиды (^{232}Th , ^{40}K) накапливаются в оборудовании скважин, технологическом оборудовании товарных парков и установках комплексной подготовки нефти [51].

Таким образом, при добыче и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений на дневную поверхность происходит вынос ЕРН, тем самым предприятия топливно-энергетического комплекса вносят свой вклад в формирование радиационного фона территорий.

Естественная радиоактивность при добыче угля

Уголь, как и большинство горных пород, содержит природные радионуклиды, выброс которых наиболее активно происходит во время его сжигания с целью производства энергии. Источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды являются и угледобывающие предприятия. На угледобывающих предприятиях происходит вынос ЕРН на поверхность, что в результате негативно сказывается на персонале угольных шахт, а также населении шахтерских городов и поселков [52].

Уголь способен накапливать в своей структуре большое количество химических элементов, в том числе и ЕРН уранового (^{238}U и продукты его распада ^{234}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po и т. д.) и ториевого (^{232}Th и продукты его распада ^{220}Rn , ^{216}Po) рядов, а также долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K .

Угольное топливо применяется для производства 38% электроэнергии во всем мире [53]. Активность ЕРН в выбросах зависит от активности ЕРН в углях, содержания в них

золы, температуры горения, соотношения тяжелых шлаков, оседающих на дне печи, и более легкой зольной пыли, а также от эффективности пылеулавливающих устройств [5]. В таблице 3 представлены обобщенные данные по диапазонам радиоактивности разнообразных углей, сжигаемых на ТЭС, и концентрации радионуклидов в шлаках и летучей золе ТЭС [54]. Данные демонстрируют существенное обогащение ЕРН продуктов горения угля, и прежде всего их легкой фракции, в сравнении с исходным сырьем.

На рисунке 6 представлено среднее содержание ЕРН в углях некоторых угольных месторождений мира. По данным Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР) [52], среднемировые удельные актив-

ности радионуклидов в углях составляют (Бк/кг): ^{238}U – 37; ^{226}Ra – 35; ^{232}Th – 30; ^{40}K – 400.

По оценкам специалистов, содержание урана в углях месторождений России не превышает среднемировых концентраций этого элемента для осадочных пород, но имеются месторождения, в которых оно превышено в несколько раз. Например, среднее содержание урана и тория в кузнецких углях составляет 4,125 и 4,198 г/т. Самые высокие концентрации радионуклидов, в частности, содержания урана, были отмечены в бурых углях пласта Итатский – 139 г/т, при сжигании данных углей на ТЭС в золошлаковых отходах содержание урана достигает 902,6 г/т [58].

Удельная активность радионуклидов в углях, шлаках и летучей золе, Бк/кг [54]

Таблица 3

[Table 3]

Specific activity of radionuclides in coal, bottom ash and fly ash, Bq/kg

Изотоп [Isotope]	Уголь [Coal]	Шлак [Slag]	Летучая зола [Fly ash]
^{238}U	9–31	56–185	70–370
^{226}Ra	7–25	20–166	85–281
^{232}Th	9–19	59	81–174
^{40}K	26–130	230–962	233–740
^{234}U	19	92	160
^{228}Th	1–20	56–81	15–130
^{210}Pb	10–26	21–185	52–1813
^{210}Po	41	13–185	196–466

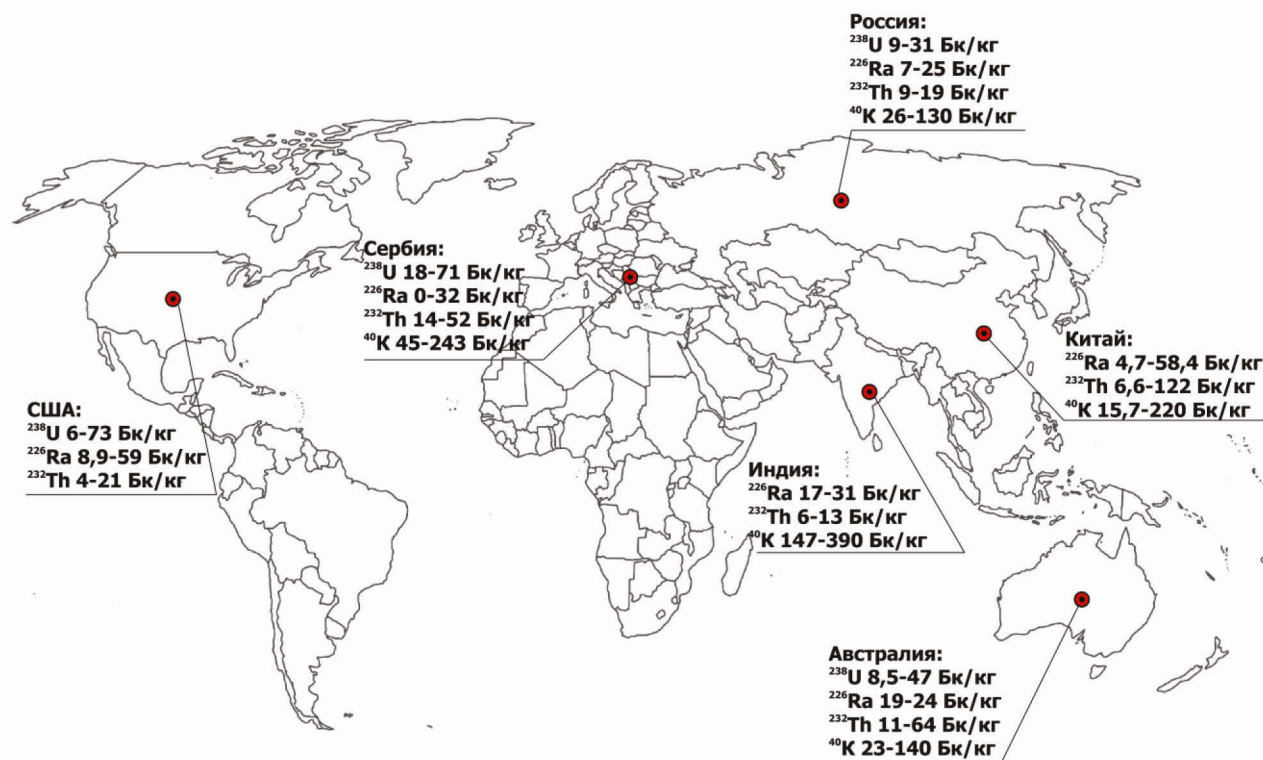


Рис. 6. Активность естественных радионуклидов в углях некоторых угольных месторождений мира [55, 56, 57]
 [Fig. 6. Naturally occurring radionuclide activity in coals from some coal deposits around the world]

Отходы от сжигания углей (золошлаковые отходы) составляют около 10% первоначального объема сжигаемого угля. При сжигании углей с повышенным содержанием ЕРН радиоактивные элементы переходят в золошлаковые отходы и в летучую золу, загрязняя атмосферу и депонирующие среды – почвы, грунты, поверхностные и подземные воды, донные отложения. В то же время вокруг ТЭС накапливаются значительные объёмы золы и шлаков, содержащих ЕРН. Это приводит к формированию техногенно измененного радиационного фона, который определяет повышенное природное облучение персонала ТЭС.

Таким образом, вынос ЕРН при добыче углей является актуальной проблемой, требующей особого внимания и контроля. Все это ставит задачи особого контроля работающих угольных ТЭС в зависимости от их территориального расположения и качества применяемого угля, возможности вторичного использования угольной золы и шлаков.

Заключение

По мере развития добывающего и топливно-энергетического комплексов происходит активный вынос на дневную поверхность вместе с минеральным сырьем естественных радионуклидов ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{238}U , что в перспективе может привести к повышению радиационного фона. Для контроля за этими процессами необходимо проведение радиационного мониторинга вблизи таких предприятий и разработка технологий, обеспечивающих минимизацию выноса природных радионуклидов при всех видах добычи и переработки минерального и органического сырья.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Перевожиков Р.Д. – существенный вклад в разработку концепции исследования, написание текста статьи.

Перевожикова А.А. – существенный вклад в разработку концепции исследования, написание текста статьи.

Меньшикова Е.А. – редактирование текста статьи, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2023 г.

Литература

1. Пельмский Г.А. Радиоактивность и экологическая геология // Жизнь Земли. 2010. Т. 32. С. 183-190.
2. Тарханов А.В., Шаталов В.В. Новые тенденции развития мировой и российской минерально-сырьевой базы урана. «Минеральное сырье». Серия геолого-экономическая, №26, -М.: ВИМС, 2008, 79 с.
3. Benarous S., Azbouche A., Boumehdi B., et al. Establishing a pre-mining baseline of natural radionuclides distribution and radiation hazard for the Bled El-Hadba sedimentary phosphate deposits (North-Eastern Algeria) // Nuclear Engineering and Technology. 2022. Vol. 54, Iss. 11. P. 4253-4264, <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.06.006>.
4. Лисаченко Э.П., Стамат И.П. Природные радионуклиды в производственных отходах предприятий неурановых отраслей (обзор) // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 70-77.
5. Гонсалес А.Х., Андерс Ж. Естественные и искусственные источники излучения: Ядерная энергия в будущем // Бюллетень МАГАТЭ, 2/1989. С. 23-35.
6. Paschoa A.S., Steinhäusler F. Terrestrial, Atmospheric, and Aquatic Natural Radioactivity. Radioactivity in the Environment. 2010. Vol. 17, No C. P. 29-85. DOI: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3).
7. Feng G., Yong J., Liu Q., et al. Response of soil microbial communities to natural radionuclides along specific-activity gradients // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2022. Vol. 246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114156>.
8. Ajayi O.S., Balogun K.O., Dike C.G. Spatial distributions and dose assessment of natural radionuclides in rocks and soils of some selected sites in southwestern Nigeria // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2017. Vol. 23, No 6. P. 1373-1388.
9. Monged M.H., Hassan H.B., El-Sayed S.A. Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Natural Radionuclides and Trace Elements in Agricultural Soil of Northeastern Nile Valley, Egypt // Water, Air, & Soil Pollution. 2020. Vol. 231, No 7. P. 1-24.
10. Galhardi J.A., García-Tenorio R., Bonotto D.M., et al. Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 177, P. 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001>
11. Darko E., Faanu A., Awudu A., et al. Public exposure to hazards associated with natural radioactivity in open-pit mining in Ghana // Radiation Protection Dosimetry. 2009. Vol. 138. P. 45-51.
12. Алексахин Р.М., Удалова А.А., Гераськин С.А. Учение о биосфере В.И. Вернадского и современные проблемы радиозологии. Радиационная биология. Радиозология. 2014. Т. 54. С. 432-439. DOI:10.7868/S0869803114040031.
13. Dina N.T., Das S.C., Kabir M.Z., et al. Natural radioactivity and its radiological implications from soils and rocks in Jaintiapur area, North-east Bangladesh // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2022 Vol. 331. P. 4457-4468. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08562-0>.
14. Errahmani D.T., Noureddine A., Hernández J.M.A. Depth-distributions and migration of fallout radionuclides in mountain soils from Chréa National Park (Algeria): The role of rhizospheres // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. Vol. 242. P. 106799, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106799>.
15. Perevoshchikov R.D., Perminova A.A., Menshikova E.A. Natural Radionuclides in Soils of Natural-Technogenic Landscapes in the Impact Zone of Potassium Salt Mining // Minerals. 2022. Vol. 12. P. 1352. <https://doi.org/10.3390/min12111352>.
16. Leal A.L.C., Lauria D.C., Ribeiro F.C.A., et. al. Spatial distributions of natural radionuclides in soils of the state of Pernambuco, Brazil: Influence of bedrocks, soils types and climates // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 211. P. 106046, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106046>.
17. Dindaroğlu T. The use of the GIS Kriging technique to determine the spatial changes of natural radionuclide concentrations in soil and forest cover // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2014. Vol. 12, Iss. 1. P. 130.
18. Мосинцев В.Н. Радиоактивные отходы уранодобывающих предприятий и их воздействие на окружающую среду. Материалы конференции ЯО СССР Москва: «Атомная энергия», 1991. Т. 70, Вып. 5. С. 282-288.
19. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозологии. Учебное пособие. Томск: STT, 2009. 430 с.

20. Ushakova E.S., Perevoshchikova A.A., Menshikova E.A., et al. Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit // *Mining*. 2023. Vol. 3, Iss. 2. P. 176-204. <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.
21. Demirchyan G.A., Movsisyan N.E., Pyuskyulyan K.I., et al. Radiological Studies at the Largest Mining Centers of Armenia // *Geochemistry International*. 2022. Vol. 60. P. 122–136. <https://doi.org/10.1134/S0016702922010049>.
22. Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Y., Tenison L.O. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining // *Russian Mining Industry*. 2022. Vol. 1. P. 41–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>.
23. Environmental Aspects of Phosphate and Potash Mining. United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics France; 2001. 60 p.
24. Prakash S., Verma J.P. Global perspective of potash for fertilizer production. In *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture*; Ed. Meena, V.S., Maurya B.R., Verma J.P., Meena R.S. Springer: New Delhi, India, 2016. P. 327–331. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_23.
25. Shen L., Siritongkham N. The characteristics, formation and exploration progress of the potash deposits on the Khorat Plateau, Thailand and Laos, Southeast Asia // *China Geology*. 2020. Vol. 3. P. 67–82. <https://doi.org/10.31035/cg2020009>.
26. Menshikova E., Perevoshchikov R., Belkin P., Blinov S. Concentrations of Natural Radionuclides (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) at the Potash Salts Deposit // *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, Iss. 3. P. 179-187. doi:10.12911/22998993/132544.
27. Baloch M.A., Qureshi A.A., Waheed A. A study on natural radioactivity in khewra salt mines, Pakistan // *Journal of Radiation Research*. 2012. Vol. 53, Iss. 3. P. 411-421. DOI: 10.1269/jrr.11162.
28. Yang Y.-X., Wu X.-M., Jiang Z.-Y., et al. Radioactivity concentrations in soils of the Xiazhuang Granite Area, China // *Applied Radiation and Isotopes*. 2005. Vol. 63, Iss. 2. P. 255–259. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.02.011.
29. Перевошиков Р.Д. Естественные радионуклиды (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) в депонирующих средах (территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 3. С. 29-38. DOI 10.18799/24131830/2022/3/3599.
30. Геологическая служба США. URL: <https://www.usgs.gov/media/images/phosphate-mine-pile> (Дата обращения: 10.07.2023).
31. Paschoa A.S., Steinhäusler F. Terrestrial, Atmospheric and Aquatic Natural Radioactivity // *Radioactivity in the Environment*. 2010. Vol. 17. P. 29-85. doi: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3.
32. Chinnaesakki S., Bara S.V., Sartandel S.J., Tripathi R. M., Puranik V.D. Performance of HPGe gamma spectrometry system for the measurement of low level radioactivity // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012. Vol. 294, №. 1. P. 143-147.
33. Zohuri B. Nuclear fuel cycle and decommissioning // *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*. Woodhead Publishing. 2020. P. 61-120.
34. Calin M.R., Radulescu I., Calin M.A. Measurement and evaluation of natural radioactivity in phosphogypsum in industrial areas from Romania // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015. Vol. 304. P. 1303–1312. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-3970-3>.
35. Boumala D., Mavon C., Belafrites A., et al. Evaluation of radionuclide concentrations and external gamma radiation levels in phosphate ores and fertilizers commonly used in Algeria // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2018. Vol. 317. P. 501–510. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5871-8>.
36. Uosif M.A.M., Mostafa A.M.A., Elsaman R., et al. Natural radioactivity levels and radiological hazards indices of chemical fertilizers commonly used in Upper Egypt // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2014. Vol. 7, Iss. 4. P. 430-437. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.006>.
37. Орлов П.М. Естественные радионуклиды в почвах России и фосфатных рудах планеты // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. № 4. С. 62-67. DOI 10.24411/2587-6740-2020-14074.
38. Gaafar I., El-Shershaby A., Zeidan I., et al. Natural radioactivity and radiation hazard assessment of phosphate mining, Quseir-Safaga area, Central Eastern Desert, Egypt // *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2016. Vol. 5, Iss. 1. P. 160-172. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.02.002>.
39. Valentin J. Pregnancy and Medical Radiation. ICRP Publication 84 // *Annals of the ICRP*. 2007. P. 49. doi:10.1016/j.icrp.2007.10.003.
40. Рихванов Л.П., Арбузов С.И., Барановская Н.В. и др. Радиоактивные элементы в окружающей среде // *Известия Томского политехнического университета*. 2007. Т. 311, № 1. С. 128-136.
41. El-Tajer A., Althoyaib S.S. Natural radioactivity levels and heavy metals in chemical and organic fertilizers used in Kingdom of Saudi Arabia // *Applied Radiation and Isotopes*. 2012. Vol. 70, №. 1. P. 290-295.
42. Lambert R., Grant C., Sauvé S. Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers // *Science of the total environment*. 2007. Vol. 378, №. 3. P. 293-305.
43. Перевошиков Р.Д., Меньшикова Е.А. Определение ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K в почвах в районе разработки месторождения калийных солей (Пермский край, Россия). Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды», Гомель, Республика Беларусь, 2-3 июня 2022. С. 84-88.
44. Хайкович И.М., Мац Н.А., Крапивский Е.И., Рыжаков В.Н. Радиационный мониторинг и дезактивация промышленных объектов, загрязненных естественными радионуклидами в результате добычи углеводородного сырья // *Известия Уральской государственной горно-геологической академии*. 2003. Вып. 17. С. 63-71.
45. Солодун В.П., Казачевский И.В., Резников С.В. и др. Измерения уровней радиоактивности при добыче, подготовке и транспортировке газонефтяного сырья // *Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ)*. 2000. №3. С. 10-14.
46. Gray P. NORM Contamination in the Petroleum Industry // *Journal of Petroleum Technology*. 1993. P. 12-16.
47. Gray P. Radioactive materials could pose problems for the gas industry // *Oil & Gas Journal*. 1990. P. 45-48.
48. Коннова Л.А., Папырин В.В., Щербakov О.В. Радиационно-экологические аспекты безопасности на объектах нефтегазовой отрасли // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2018. № 1. С. 26-30.
49. TENORM: Oil and Gas Production Wastes. URL: <https://www.epa.gov/radiation/tenorm-oil-and-gas-productionwastes> (Дата обращения: 10.07.2023).
50. Тахаутдинов Ш.Ф., Сизов Б.А., Дияшев Р.Н., Зайцев В.И. Безопасность труда в промышленности. 1995. № 2. С. 36–39.
51. Хуснуллин М.Х. Геофизические методы контроля разработки нефтяных пластов. М.: Недра, 1989. 190 с.
52. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation // *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York. 2000. P. 40–75.
53. Habib Md.A., Khan R., Phoungthong Kh. Evaluation of environmental radioactivity in soils around a coal burning power plant and a coal mining area in Barapukuria, Bangladesh: Radiological risks assessment // *Chemical Geology*.

2022. Vol. 600. P. 120865, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120865>.
54. Сидорова Г.П., Крылов Д.А. Проблемы радиационной опасности в угольной энергетике // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. №11. С. 200-209.
55. Jankovic M.M., Todorovic D.J., Nikolic J.D. Analysis of Natural Radionuclides in Coal, Slag and Ash in Coal – Fired Power Plants in Serbia // Journal of Mining and Metallurgy. 2011. Vol. 47. P. 149–155.
56. Suhana J., Mohd R. Analysis of Natural Radioactivity in Coal and Ashes from a Coal Fired Power Plant // Chemical Engineering Transactions. 2015. Vol. 45. P. 1549–1554.
57. Xinwei L., Xiaodan J., Fengling W. Natural Radioactivity of Coal and its by-products in the Baoji Coal-fired Power Plant // China – Current science. 2006. Vol. 91, No. 11. P. 1508–1511.
58. Нифантов Б.Ф., Потапов В.П., Анферов Б.А., Кузнецов Л.В. Угли Кузбасса: химические элементы-примеси и технология их извлечения при комплексном освоении месторождений. Кемерово: ИУ СО РАН, 2011. 310 с.

Поступила: 12.07.2023 г.

Перевощиков Роман Дмитриевич – ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета. **Адрес для переписки:** 614068, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, 4; E-mail: rperevoshnikov@bk.ru
ORCID: 0000-0001-6451-8202

Перевощикова Анна Александровна – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета, аспирант факультета химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия
ORCID: 0000-0003-1769-7740

Меньшикова Елена Александровна – ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета, доктор геолого-минералогических наук, доцент, Пермь, Россия
ORCID: 0000-0001-5199-7590

Для цитирования: Перевощиков Р.Д., Перевощикова А.А., Меньшикова Е.А. Влияние добывающих и топливно-энергетических предприятий на радиационный фон территорий // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 70-83. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-70-83

Impact of mining and fuel and energy enterprises on the radiation background of territories

Roman D. Perevoshchikov¹, Anna A. Perevoshchikova^{1,2}, Elena A. Menshikova¹

¹ Institute of Natural Science, Perm State University, Perm, Russia

² Chemical Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

This review provides information on the radiation situation in mining and energy production facilities. Mining activities are considered as one of the significant sources of radioactivity. Many radionuclides and metals that are transported by surface and ground waters, air flows over significant distances, contaminating soils, subsoil and bottom sediments of the adjacent territory, forming geochemically specific natural-technogenic areas. In this work is given an overview of radiation conditions in the territories of potassium phosphate, hydrocarbon and coal deposits. Developed potassium ores are the source of ⁴⁰K emission into the environment. According to the results obtained, the migration of investigated radionuclides is limited to the zone of 2 km. Only an insignificant part of the investigated samples (8%) exceeds the world average activity of ⁴⁰K for soils. In bottom sediments, the average activity of ⁴⁰K does not exceed the values for other territories with anthropogenic impact. More than 30 million tonnes of phosphate fertilizers are consumed worldwide each year, and their use increases crop production. However, a possible negative effect of these fertilisers is the contamination of cultivated land with some natural radionuclides. Uranium concentrations in phosphate vary from 37 to 4900 Bq/kg for ²³⁸U and from 100 to 10 000 Bq/kg for ²²⁶Ra. The amount of

Roman D. Perevoshchikov

Institute of Natural Science

Address for correspondence: Genkel Str., 4, Perm, 614068, Russia; E-mail: rperevoshnikov@bk.ru

radioactivity in oil, gas and formation water is estimated through determination of ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . According to the published data, increased radiation background is observed near wellheads, in the places of oil sludge accumulation, near the flares at oil and gas enterprises, as a result of bringing a number of natural and man-made radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr , etc.) to the day surface. Coal mines are sources of radioactive contamination. This results from the extraction of large amounts of natural radionuclides from the subsoil together with the coal. This paper presents the average natural radionuclides content in coals from some of the world's coal mines. With the development of mining and fuel-energy complexes, there is an active export to the surface together with minerals of natural radionuclides ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{238}U , which leads to an increase in the radiation load on the environment. In this connection, the problems of ensuring radiation safety at the facilities of mining and fuel and energy industry require the closest attention.

Key words: natural radionuclides, extractive enterprises, fuel-energy enterprises, environmental monitoring.

Authors personal contribution

Perevoshchikov R.D. – significant contribution to the development of the research concept, writing the text of the article.

Perevoshchikova A.A. – substantial contribution to the development of the research concept, writing the text of the article.

Menshikova E.A. – editing of the text of the article, approval of the final version of the article for publication.

Conflicts of interests

The authors declare no conflict of interest.

Information on the source of funding

The research was carried out with the financial support of the Perm Scientific and Educational Centre "Rational Subsoil Use", 2023.

References

1. Pelymsky GA. Radioactivity and ecological geology. *Earth Life*. 2010;32: 183-190. (In Russian).
2. Tarkhanov AV, Shatalov VV. New trends in development of world and Russian mineral raw material base of uranium. "Mineral Resources. Geological and Economic Series, No. 26. Moscow: VIMS; 2008, 79 p. (In Russian).
3. Benarous S, Azbouche A, Boumehdi B, Chegrouche S, Atamna N, Khelifi R. Establishing a pre-mining baseline of natural radionuclides distribution and radiation hazard for the Bled El-Hadba sedimentary phosphate deposits (North-Eastern Algeria). *Nuclear Engineering and Technology*. 2022;54(11): 4253-4264, <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.06.006>.
4. Lisachenko EP, Stamat IP. Natural radionuclides in production wastes of non-uranium industry enterprises (review). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 70-77. (In Russian).
5. Gonzalez AX, Andere J. Natural and artificial sources of radiation: Nuclear energy in the future. *Byulleten MAGATE = IAEA BULLETIN*. 1989;2: 23-35 (In Russian).
6. Paschoa AS, Steinhäusler F. Terrestrial, Atmospheric, and Aquatic Natural Radioactivity. *Radioactivity in the Environment*. 2010;17(C): 29-85. DOI: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3.)
7. Feng G, Yong J, Liu Q, Chen H, Mao P. Response of soil microbial communities to natural radionuclides along specific-activity gradients. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022;246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114156>.
8. Ajayi OS, Balogun KO, Dike CG. Spatial distributions and dose assessment of natural radionuclides in rocks and soils of some selected sites in southwestern Nigeria. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2017;23(6): 1373-1388.
9. Monged MH, Hassan HB, El-Sayed SA. Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Natural Radionuclides and Trace Elements in Agricultural Soil of Northeastern Nile Valley, Egypt. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020;231(7): 1-24.
10. Galhardi JuA, García-Tenorio R, Bonotto DM, Francés ID, Motta JG. Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017;177: 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001>.
11. Darko E, Faanu A, Awudu A, Emi-Reynolds G, Yeboah J, Oppon OC, et al. Public exposure to hazards associated with natural radioactivity in open-pit mining in Ghana. *Radiation Protection Dosimetry*. 2009;138: 45-51.
12. Aleksakhin RM, Udalova AA, Geraskin SA. Doctrine on biosphere of VI Vernadsky and modern problems of radioecology. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2014;54: 432-439. (In Russian) DOI:10.7868/S0869803114040031.
13. Dina NT, Das SC, Kabir MZ, Rasul MdG, Deeba F, Rajib M, et al. Natural radioactivity and its radiological implications from soils and rocks in Jaintiapur area, North-east Bangladesh. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2022;331: 4457-4468. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08562-0>.
14. Errahmani DT, Nouredine A, Hernández JMA. Depth-distributions and migration of fallout radionuclides in mountain soils from Chréa National Park (Algeria): The role of rhizospheres. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022;242: 106799, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106799>.
15. Perevoshchikov RD, Perminova AA, Menshikova EA. Natural Radionuclides in Soils of Natural-Technogenic Landscapes in the Impact Zone of Potassium Salt Mining. *Minerals*. 2022;12: 1352. <https://doi.org/10.3390/min12111352>.
16. Leal ALC, Lauria DC, Fernando CA, Ribeiro VEP, Franzen M, Lima EAM. Spatial distributions of natural radionuclides in soils of the state of Pernambuco, Brazil: Influence of bedrocks, soils types and climates. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;211: 106046, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106046>.
17. Dindaroğlu T. The use of the GIS Kriging technique to determine the spatial changes of natural radionuclide concentrations in soil and forest cover. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2014;12(1): 130.
18. Mosinets VN. Radioactive Waste of Uranium Mining Enterprises and its Impact on the Environment. Proceedings of the USSR NWD Conference "Atomic Energy". Moscow. 1991;70(5): 282-288. (In Russian).
19. Rikhsanov LP. Radioactive elements in the environment and problems of radioecology. Textbook. Tomsk: STT; 2009. P. 430. (In Russian).
20. Ushakova ES, Perevoshchikova AA, Menshikova EA, Khayrulina E, Perevoshchikov R, Belkin PA. Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. *Mining*. 2023;3(2): 176-204. <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.

21. Demirchyan GA, Movsisyan NE, Pyuskyulyan KI, Belyaeva OA. Radiological Studies at the Largest Mining Centers of Armenia. *Geochemistry International*. 2022;60: 122–136. <https://doi.org/10.1134/S0016702922010049>.
22. Baryakh AA, Smirnov EV, Kvitkin SY, Tenison LO. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining. *Russian Mining Industry*. 2022;1: 41–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>.
23. Environmental Aspects of Phosphate and Potash Mining // United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics France; 2001. 60 p.
24. Prakash S, Verma JP. Global perspective of potash for fertilizer production. In Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. Eds. Meena VS, Maurya BR, Verma JP, Meena RS. Springer: New Delhi, India; 2016. P. 327–331. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_23.
25. Shen L, Siritongkham N. The characteristics, formation and exploration progress of the potash deposits on the Khorat Plateau, Thailand and Laos, Southeast Asia. *China Geology*. 2020;3: 67–82. <https://doi.org/10.31035/cg2020009>.
26. Menshikova E, Perevoshchikov R, Belkin P, Blinov S. Concentrations of Natural Radionuclides (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) at the Potash Salts Deposit. *Journal of Ecological Engineering*. 2021;22(3): 179–187. doi:10.12911/22998993/132544.
27. Baloch MA, Qureshi AA, Waheed A. A study on natural radioactivity in khewra salt mines, Pakistan. *Journal of Radiation Research*. 2012;53(3): 411–421. DOI: 10.1269/jrr.11162.
28. Yang Y-X, Wu X-M, Jiang Z-Y, Wang W-X, Lu J-G, Lin J, et al. Radioactivity concentrations in soils of the Xiazhuang Granite Area, China. *Applied Radiation and Isotopes*. 2005;63(2): P. 255–259. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.02.011.
29. Perevoshchikov RD. Natural radionuclides (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) in depositing media (Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit area) // *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*. 2022;333(3): 29–38. (In Russian). DOI 10.18799/24131830/2022/3/3599.
30. U.S. Geological Survey. Available from: <https://www.usgs.gov/media/images/phosphate-mine-pile> (Accessed: 10.07.2023).
31. Paschoa AS, Steinhäusler F. Terrestrial, Atmospheric and Aquatic Natural Radioactivity. *Radioactivity in the Environment*. 2010;17: 29–85. DOI: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3.
32. Chinnnaesakki S, Bara SV, Sartandel SJ, Tripathi RM, Puranik VD. Performance of HPGe gamma spectrometry system for the measurement of low level radioactivity. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012;294(1): 143–147.
33. Zohuri B. Nuclear fuel cycle and decommissioning. Nuclear Reactor Technology Development and Utilization. Woodhead Publishing; 2020. P. 61–120.
34. Calin MR, Radulescu I, Calin MA. Measurement and evaluation of natural radioactivity in phosphogypsum in industrial areas from Romania. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015;304: 1303–1312. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-3970-3>.
35. Boumala D, Mavon C, Belafrites A, Tedjani A, Groetz J-E. Evaluation of radionuclide concentrations and external gamma radiation levels in phosphate ores and fertilizers commonly used in Algeria. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2018;317: 501–510. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5871-8>.
36. Uosif MAM, Mostafa AMA, Elsamani R, El-sayed M. Natural radioactivity levels and radiological hazards indices of chemical fertilizers commonly used in Upper Egypt. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2014;7(4): 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.006>.
37. Orlov PM. Natural radionuclides in soils of Russia and phosphate ores of the planet. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal = International Agricultural Journal*. 2020;4.: 62–67. (In Russian). DOI 10.24411/2587-6740-2020-14074.
38. Gaafar I, El-Shershaby A, Zeidan I, El-Ahl LS. Natural radioactivity and radiation hazard assessment of phosphate mining, Quseir-Safaga area, Central Eastern Desert, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2016;5(1): 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.02.002>.
39. Valentin J. Pregnancy and Medical Radiation. ICRP Publication 84. *Annals of the ICRP*. 2007: 49. doi:10.1016/j.icrp.2007.10.003.
40. Rikhvanov LP, Arbuzov SI, Baranovskaya NV, Volostnov AV, Arkhangel'skaya TA, Mezhibor AM, et al. Radioactive elements in the environment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 2007;311(1): 128–136 (In Russian).
41. El-Taher A, Althoyaib SS. Natural radioactivity levels and heavy metals in chemical and organic fertilizers used in Kingdom of Saudi Arabia. *Applied Radiation and Isotopes*. 2012;70(1): 290–295.
42. Lambert R, Grant C, Sauvé S. Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers. *Science of the total environment*. 2007;378(3): 293–305.
43. Perevoshchikov RD, Menshikova EA. Determination of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K in soils in the potassium salt mining area (Perm Region, Russia). Collection of the reports and theses of scientific conf. "Transboundary cooperation in the field of ecological safety and environment protection", Gomel, Republic of Belarus, June, 2–3, 2022. P. 84–88. (In Russian).
44. Haikovich IM, Matz NA, Krapivsky EI, Ryzhakov VN. Radiation monitoring and decontamination of field facilities contaminated by natural radionuclides as a result of hydrocarbon production. *Izvestiya Uralskoy gosudarstvennoy gorno-geologicheskoy akademii = Proceedings of Ural State Mining and Geological Academy*. 2003;17: 63–71. (In Russian).
45. Solodukhin VP, Kazachevsky IV, Reznikov SP, Kazachevsky IV, Reznikov SV, et al. Measurements of radioactivity levels during extraction, preparation and transportation of gas-oil raw materials. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy (ANRI) = Apparatus and News of Radiation Measurements (ANRI)*. 2000;3: 10–14. (In Russian).
46. Gray P. NORM Contamination in the Petroleum Industry. *Journal of Petroleum Technology*. 1993: 12–16.
47. Gray P. Radioactive materials could pose problems for the gas industry. *Oil & Gas Journal*. 1990: 45–48.
48. Konnova LA, Papyrin VV, Shcherbakov OV. Radiation and ecological aspects of safety at the objects of oil and gas industry. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse = Environmental protection in oil and gas complex*. 2018;1: 26–30. (In Russian).
49. TENORM: Oil and Gas Production Wastes. Available from: <https://www.epa.gov/radiation/tenorm-oil-and-gas-productionwastes>. (Accessed: 10.07.2023).
50. Takhautdinov ShF, Sizov BA, Diyashev RN, Zaitsev VI. Safety of labour in industry. 1995. № 2. P. 36–39. (In Russian).
51. Khusnullin M.Kh. Geophysical methods of control of oil reservoir development. Moscow: Nedra; 1989. 190 p. (In Russian).
52. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York; 2000. P. 40–75.
53. Habib MdA, Khan R, Phoungthong Kh. Evaluation of environmental radioactivity in soils around a coal burning power plant and a coal mining area in Barapukuria, Bangladesh: Radiological risks assessment. *Chemical Geology*. 2022;600: 120865, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120865>.
54. Sidorova GP, Krylov DA. Problems of radiation hazards in coal-fired power engineering. *Gornyy informatsionno-*

analiticheskiy byulleten = Mining Information and Analytical Bulletin. 2017;11: 200-209. (In Russian).

55. Jankovic MM, Todorovic DJ, Nikolic JD. Analysis of Natural Radionuclides in Coal, Slag and Ash in Coal – Fired Power Plants in Serbia. *Journal of Mining and Metallurgy*. 2011;47: 149–155.
56. Suhana J, Mohd R. Analysis of Natural Radioactivity in Coal and Ashes from a Coal Fired Power Plant. *Chemical Engineering Transactions*. 2015;45: 1549–1554.
57. Xinwei L, Xiaodan J, Fengling W. Natural Radioactivity of Coal and its by-products in the Baoji Coal-fired Power Plant. *China – Current science*. 2006;91(11): 1508–1511.
58. Nifantov BF, Potapov VP, Anferov BA, Kuznetsov LV. Kuzbass coal: chemical elements-impurities and technology of their extraction in the complex development of deposits. Kemerovo: IS RAS Siberian Branch; 2011. 310 p. (In Russian).

Received: July 12, 2023

For correspondence: Roman D. Perevoshchikov – leading engineer of the research laboratory of Environmental Geology of the Natural Science Institute of Perm State National Research University (Genkel Str., 4, Perm, 614068, Russia; E-mail: rperevoshchikov@bk.ru)

ORCID: 0000-0001-6451-8202

Anna A. Perevoshchikova – Junior Researcher at the Research Laboratory for Biogeochemistry of Man-Made Landscapes, Institute of Natural Science at the Perm State National Research University; PhD student at the Department of Chemical Technology, Industrial Ecology and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

ORCID: 0000-0003-1769-7740

Elena A. Menshikova – Leading Researcher of the Ecological Geology Research Laboratory of the Natural Science Institute of Perm State National Research Polytechnic University, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Perm, Russia

ORCID: 0000-0001-5199-7590

For citation: Perevoshchikov R.D., Perevoshchikova A.A., Menshikova E.A. Impact of mining and fuel and energy enterprises on the radiation background of territories. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 70-83. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-70-83

Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия

А.А. Цапалов¹, С.М. Киселев², К.Л. Ковлер³, П.С. Микляев⁴, Т.Б. Петрова⁵, М.В. Жуковский⁶,
И.В. Ярмошенко⁶, А.М. Маренный⁷, О.Е. Тутельян⁸, С.И. Кувшинников⁸

¹ Научно-производственное предприятие «ДОЗА», Зеленоград, Москва, Россия

² Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

³ Израильский технологический институт «Технион», Хайфа, Израиль

⁴ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁶ Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

⁷ Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

⁸ Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

В любых зданиях, включая незаселенные с ограниченной вентиляцией, наблюдаются значительные временные вариации радона. Этот факт обуславливает серьезные затруднения в проведении радиационного контроля для оценки соответствия помещений требованиям норматива, который ограничивает среднее за год содержание радона в зданиях. Поэтому ни на национальном, ни на международном уровне до сих пор не решена проблема стандартизации контроля радона в зданиях, если продолжительность теста меньше 1 года. Анализ подходов к контролю радона, включая оценку эффективности регулирования, показывает весьма существенные отличия между практиками, сложившимися в разных странах. Например, в России в основном применяются мгновенные (не более 20 мин) измерения, а мероприятия по защите существующих зданий от радона практически не проводятся. В европейских странах, как правило, применяются долгосрочные (не менее 2 месяцев) измерения, а мероприятия по защите зданий от радона проводятся все еще относительно редко, за исключением Великобритании и Швеции. В США массово применяются краткосрочные (2–7 дней) измерения, которые не только проводят, но и оплачивают сами жители, включая мероприятия по защите зданий от радона. Однако, несмотря на сложившиеся подходы к контролю радона в зданиях в России и США, существует устойчивое недоверие среди специалистов к результатам краткосрочных и тем более мгновенных измерений. В этой связи предлагается компромиссный подход для стандартизации контроля радона на основе рационального критерия за счет применения таких фундаментальных концепций ISO/IEC, как «Неопределенность измерения» и «Оценка соответствия». Рациональный критерий оценки соответствия позволяет использовать измерения разной длительности, обеспечивая заданную надежность при принятии решения. Также предлагается обоснование оптимизации контроля радона в зданиях через участие не только специалистов, но и самого населения благодаря возможности внедрения простых методов и недорогих средств измерений радона в рамках рационального критерия.

Ключевые слова: радон, здания, временные вариации, нормативный уровень, стандартизация, неопределенность измерений, оценка соответствия, рациональный критерий, продолжительность измерений.

Введение

По данным НКДАР ООН [1], вклад радона составляет 42% (или 1,26 мЗв/год) в индивидуальную дозу от всех природных и техногенных источников, равную 3,0 мЗв/год. В России вклад радона больше и составляет 46%,

что соответствует 1,99 мЗв/год при индивидуальной дозе от всех источников 4,35 мЗв/год [2]. В то же время глобальный вклад от диагностических процедур в медицине составляет не более 20%, а вклады от загрязнений, обусловленных, например, аварией в Чернобыле или произ-

Цапалов Андрей Анатольевич

Научно-производственное предприятие «ДОЗА»

Адрес для переписки: 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский пр., д. 5, этаж 2, комната 49;

E-mail: andrey-ants@yandex.ru

водством атомной энергии (включая добычу урана), не превышают 0,1% и 0,01% соответственно [1]. Поэтому, вопреки весьма распространенному мнению об опасности объектов атомной энергетики и медицинских процедур, основным фактором радиационного риска являются жилища и рабочие места, поскольку 80–90% времени люди проводят внутри зданий [3], где содержание радона всегда выше, чем в наружном воздухе.

В отличие от других источников, таких как космическое или терригенное (земное) излучение, воздействие радона можно регулировать, добиваясь снижения риска. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения [4], среднегодовая объемная активность (ОА) радона в помещениях не должна превышать 300 Бк/м³. Национальные нормативные уровни (НУ) отличаются по странам из-за различий в региональных уровнях радона и обычно составляют от 100 до 300 Бк/м³. Например, НУ = 300 Бк/м³ в Германии, Испании, Португалии и Франции; НУ = 200 Бк/м³ в Ирландии, Израиле и Швеции; НУ = 100 Бк/м³ в Дании, Нидерландах и Норвегии¹. В США концентрация радона в жилых помещениях ограничивается через уровень действия (action level), равный 4 пКи/л (148 Бк/м³) [5,6], который не является аналогом НУ [7]. В России нормируется среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) изотопов радона, уровень которой не должен превышать 100 (200) Бк/м³ для новых зданий и 200 (400) Бк/м³ для существующих зданий, согласно СанПиН 2.6.1.2523-09² (в скобках приводится эквивалент НУ в единицах ОА без учета вклада торона).

Дополнительное требование в европейском регулировании радона связано с определением радоноопасных территорий в рамках национальных планов действий по радону (radon action plan), которые должны быть реализованы в каждой стране Европейского Союза (ЕС) [8]. Считается, что измерения радона в зданиях, расположенных на радоноопасных территориях (обычно охватывающих относительно небольшую площадь страны), должны быть приоритетными, поскольку такой выборочный контроль обеспечивает более эффективное регулирование. Однако многолетний опыт, полученный в Швеции [9], а также недавнее расчетное исследование, проведенное в Германии [10], свидетельствуют о необходимости проведения измерений во всех районах страны, независимо от регионального уровня радона в зданиях. Наконец, такой же подход рекомендуется в 126 публикации МКРЗ [11]. Строго говоря, эта рекомендация не является новостью. Давно известно, что из-за логнормального распределения ОА радона в выборках зданий [12] высокие уровни радона могут обнаруживаться не только в зданиях, расположенных на радоноопасных территориях, но также «...в любом доме на любом участке земли... Измерение –

единственный способ узнать... Концентрацию радона нельзя предсказать на основе измерений радона в штате или в районе» [5, 6]. Это означает, что любое существующее здание является объектом потенциального риска из-за возможного повышенного облучения населения радоном и поэтому должно быть обследовано.

В то же время, например, только в России насчитывается около 1 млн жилых зданий³, поэтому целесообразно создать условия для широкомасштабных (массовых) обследований и эффективной идентификации опасных зданий, обеспечивая не только достаточную точность измерений ОА радона, но и высокую надежность решений о соответствии тестируемых объектов нормативу. Для реализации столь амбициозной задачи предлагается мотивировать само население на проведение измерений радона, в том числе за счет возможности применения простых методов и недорогих средств измерений (или пробоотбора). Непрерывное в течение десятилетий аккумулирование результатов массовых измерений дает возможность более детально картировать радоноопасные территории, а также точнее оценивать коллективные риски, обусловленные радоном, включая мониторинг эффективности регулирования.

Учитывая вышесказанное, основная цель настоящего обзора заключается в анализе российской и международной практики для поиска и обоснования рационального решения, обеспечивающего эффективный и надежный массовый контроль содержания радона в зданиях.

Проблема контроля радона

Концентрация радона, выраженная в единицах ОА или ЭРОА, в любом помещении жилого, общественного или производственного здания подвержена значительным временным колебаниям [7, 13, 14, 15], даже при постоянно закрытых окнах и дверях, как видно на рисунке 1. Важно уточнить, что после закрытия дверей и окон ОА радона в зданиях может неконтролируемо изменяться (увеличиваться или даже уменьшаться) со снижением амплитуды временных колебаний лишь в 1,5–2,0 раза в среднем [7, 14, 15, 16]. В любом случае, независимо от режима вентиляции в помещениях и зданиях, всегда наблюдаются значительные временные вариации радона. На рисунке 1 специально приводятся несколько типичных примеров вариаций ОА и ЭРОА радона в постоянно закрытых помещениях в течение 1 года, чтобы ориентировочно представлять размах отклонений результатов измерений с интервалом интегрирования 3 ч от среднегодового уровня.

Полезно также обсудить одно исключение из правил. Например, в Израиле во многих зданиях предусмотрены специальные герметичные комнаты для убежища в случае ракетной или газовой атаки. В таких убежищах толь-

¹ WHO, National Radon Reference Levels, Data by Country, <https://apps.who.int/gho/data/view.main.RADON03v> [Accessed 29 May 2023]

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

³ Информационный портал о жилом фонде в РФ [Information portal about the housing stock in Russia], <https://dom.mingkh.ru/> (Дата обращения: 29.05.2023)

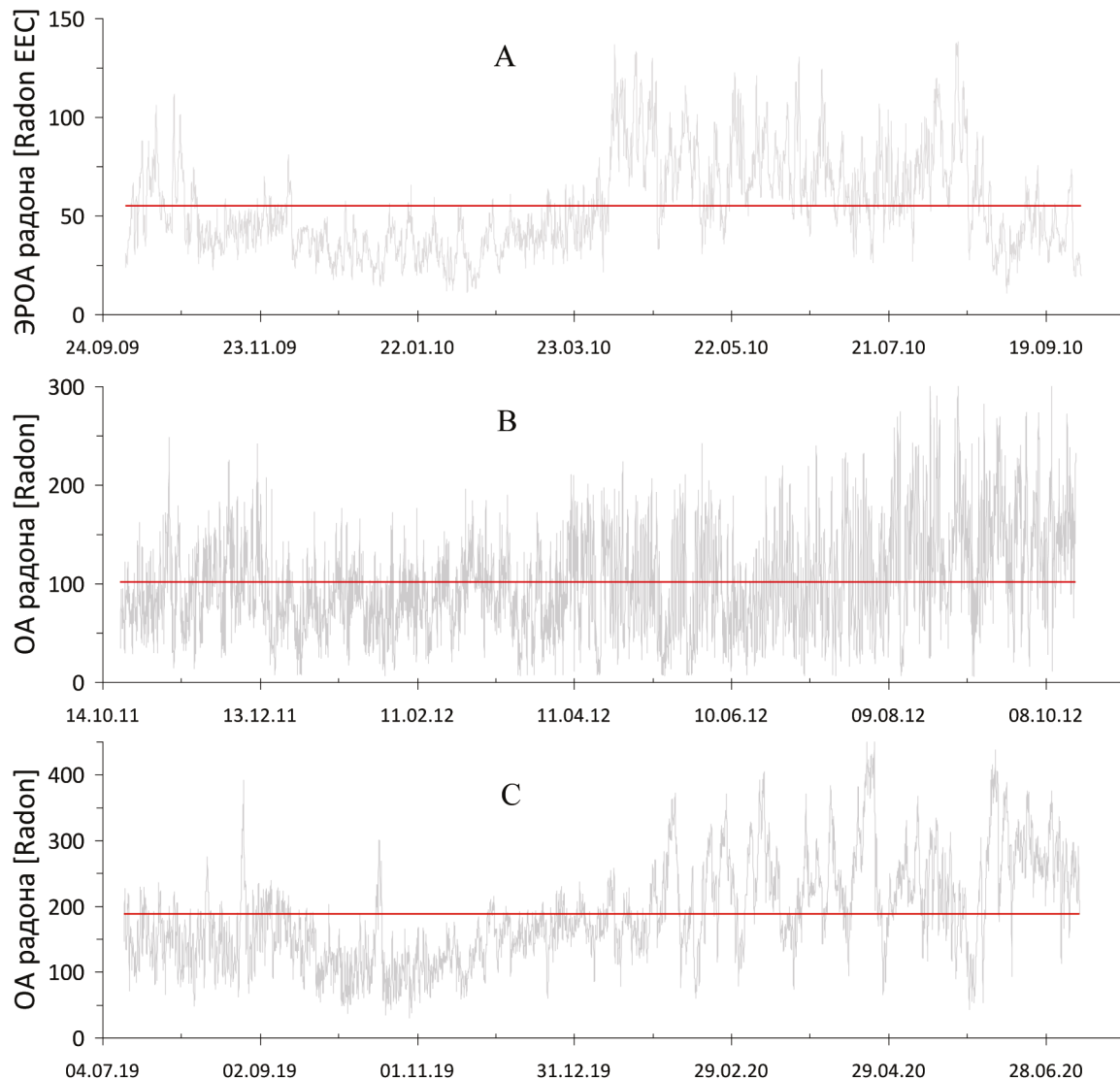


Рис. 1. Примеры вариаций ОА и ЭРОА радона ($\text{Бк}/\text{м}^3$), измеренные с интервалом интегрирования 3 ч, по сравнению со среднегодовым уровнем (красная линия) в постоянно закрытых помещениях с естественной вентиляцией и следующими характеристиками: А – архив, крайне редко посещаемое помещение без окон, расположенное в подвале многоэтажного здания Федерального центра Роспотребнадзора (в Москве) [14]; В – спальня с маленькими окнами в одноэтажном деревянном доме старой постройки из кирпича (в Рязанской области), который отапливался, но не использовался для проживания [14]; С – редко посещаемая подвальная комната с маленькими окнами, на уровне цоколя в трехэтажном жилом частном доме (в Израиле) [7]

[Fig. 1.] Examples of variations in concentration and EEC of radon (Bq/m^3), measured with an integration interval of 3 hours, compared with the annual average level (red line) in permanently closed rooms with natural ventilation and the following characteristics: A is the extremely rarely visited room (archive) without windows, located in the basement of a multi-storey building of the Federal Center of Hygiene and Epidemiology (in Moscow) [14]; B is the bedroom with small windows in a one-story dwelling of an old brick building (in the Ryazan region, Russia), which was heated but not used for living [14]; C is the rarely visited room with small windows, at basement level in a three-story dwelling (in Israel) [7]]

ко строительный материал ограждений может служить источником радона, который накапливается без существенных колебаний во времени, если комната постоянно закрыта [17]. Однако в таких необычных условиях (при экстремально ограниченной или отсутствующей вентиляции) люди не могут находиться длительное время.

Вследствие столь вариабельного и сложно предсказуемого поведения радона во времени до сих пор отсутствует согласованная на международном уровне позиция к пониманию того, насколько результаты измерений в течение нескольких дней или месяцев (т.е. менее 1 года) отличаются от среднегодовых уровней ОА или ЭРОА ра-

дона и как сравнивать результаты таких измерений с НУ. В связи с этим возникает принципиальный вопрос контроля, как принять надежное решение о соответствии помещения установленным нормативам, если длительность измерений менее 1 года. В то же время очевидно, что результат мгновенного измерения (длительностью несколько минут или часов) нельзя применять для оценки соответствия из-за крайне высокой неопределенности амплитуды колебаний радона, согласно рисунку 1. Также очевидно, что чем дольше измерение, тем меньше неопределенность (или доверительный интервал) оценки среднегодового уровня и, соответственно, выше надеж-

ность оценки соответствия нормативу. Действительно, с увеличением продолжительности контроля временные колебания измеренной ОА или ЭРОА радона будут снижаться, приближаясь к среднегодовому значению [16, 18]. Однако, несмотря на снижение точности в оценке среднегодового уровня, измерения в течение нескольких месяцев и тем более целого года проводятся гораздо реже, чем краткосрочные (2–7 суток). Данное противоречие, связанное с проблемой контроля, все еще не имеет согласованного рационального решения и выражается, например, в принципиально разных практиках контроля радона в ЕС и США.

Подходы к контролю радона в разных странах и их эффективность

В России относительно интенсивные измерения радона стали проводиться после принятия НРБ-96⁴, когда в отечественных Нормах радиационной безопасности впервые было введено ограничение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в зданиях. Через 2 года были введены в действие методические указания по обследованию жилых и общественных зданий – МУ 2.6.1.715-98⁵, в которых впервые был предложен критерий оценки соответствия тестируемого помещения требованиям норматива, учитывающий временные вариации радона. Суть критерия заключалась в сравнении НУ с верхней границей доверительного интервала среднегодовой ЭРОА, которая оценивалась по результату измерения ЭРОА или ОА радона с учетом значения коэффициента вариации, зависящего от продолжительности измерений. К сожалению, в МУ 2.6.1.715-98 не раскрывался способ определения коэффициента вариации, а также допускалось проведение мгновенных измерений.

Предложенный в МУ 2.6.1.715-98 критерий после небольшого преобразования (без изменения сути) и удаления «торонового» слагаемого принимает следующий, более удобный для анализа вид:

$$C_{\text{Э}} \cdot [1 + U_H] \cdot V_{Rn}(t) < C_{HY}, \quad (1)$$

где $C_{\text{Э}}$ – измеренная ЭРОА радона (или ОА радона, умноженная на 0,5);

C_{HY} – нормативный уровень в единицах ЭРОА;

U_H – основная погрешность измерения, принимаемая по свидетельству о поверке средства измерений, или инструментальная неопределенность в современной терминологии;

$V_{Rn}(t)$ – коэффициент временных вариаций радона, значения которого указаны в таблице 1 (в МУ 2.6.1.715-98 этот коэффициент назван «коэффициентом вариации», что не вполне корректно в рамках математической терминологии).

Через 13 лет взамен МУ 2.6.1.715-98 были введены в действие МУ 2.6.1.2838-11⁶, в которых значения $V_{Rn}(t)$ существенно ниже и не зависят от продолжительности измерений, а также отличаются более слабой зависимостью от сезона измерений, согласно таблице 1. К сожалению, в МУ 2.6.1.2838-11 тоже не представлены ни алгоритм определения коэффициента $V_{Rn}(t)$, ни обоснование столь радикального изменения его значений. В то же время указанные в таблице 1 значения (1,0 и 1,3) действуют «до получения функциональной зависимости» коэффициента временных вариаций радона, как сообщается в п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11. В этой связи были проведены специальные исследования [19–24], результаты которых были обобщены и выражены в МУ 2.6.1.037-2015⁷ с целью уточнения значений коэффициента и структуры формулы критерия соответствия. Уточненный критерий удобнее показать здесь в следующем виде, не включая «тороновую» компоненту:

$$C_{\text{Э}} \cdot \left[1 + \sqrt{K_V(t)^2 + U_H^2} \right] < C_{HY}. \quad (2)$$

В отличие от ранее выпущенных методических указаний, алгоритм определения значений коэффициента временных вариаций радона $K_V(t)$ приводится в МУ 2.6.1.037-2015.

Уточнение структуры критерия было обусловлено необходимостью следовать фундаментальным концепциям ISO/IEC [25–27], которые определяют правила выраже-

⁴ Нормы радиационной безопасности (НРБ-96): Гигиенические нормативы ГН 2.6.1.054-96. Утверждены Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 19.04.1996 г. № 7, отменены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 02.07.1999 г. № 6/н [Norms of radiation safety (NRB-96). Hygienic norms 2.6.1.054-96. Approved by the resolution of the State committee for sanitary and epidemiological surveillance of the Russian Federation of 19.04.1996 No. 7, cancelled by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 02.07.1999. (In Russ.)].

⁵ Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий : методические указания МУ 2.6.1.715-98. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 24.08.1998 г., отменены с 28.02.2011 г. с введением в действие МУ 2.6.1.2838-11 [Carrying out radiation-hygienic examination of residential and public buildings. Guidelines MU 2.6.1.715-98. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 24.08.1998, cancelled from 28.02.2011 with the entry into force of MU 2.6.1.2838-11. (In Russ.)].

⁶ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности : методические указания МУ 2.6.1.2838-11. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011 г. (далее – МУ 2.6.1.2838-11) [Radiation control and sanitary and epidemiological assessment of residential, public and industrial buildings and facilities after their construction, overhaul, reconstruction according to radiation safety indicators. Guidelines MU 2.6.1.2838-11. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 28.01.2011 (hereinafter – MU 2.6.1.2838-11). (In Russ.)].

⁷ Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности : методические указания МУ 2.6.1.037-2015. Утверждены и введены в действие Федеральным медико-биологическим агентством 14.05.2015 г. [Determination of the average annual EEC of radon isotopes in indoor air based on the results of measurements of different durations. Guidelines MU 2.6.1.037-2015. Approved and put in force by the Federal Medical and Biological Agency on 14.05.2015. (In Russ.)].

Значения коэффициента временных вариаций радона в разных методических указаниях

Таблица 1

The coefficient of temporal variations of indoor radon from different guidelines]

[Table 1

МУ 2.6.1.* [Guidelines 2.6.1.*]	Сезон [Season]	Продолжительность измерений [Measurement duration]			
		< 1 ч [< 1 hour]	1–3 сут [1–3 days]	1–2 недели [1–2 weeks]	1–3 месяца [1–3 months]
715-98	Теплый [Warm]	3,0	2,3	1,8	1,5
	Холодный [Cold]	1,5	1,1	0,95	0,75
2838-11	Теплый [Warm]			1,3	
	Холодный [Cold]			1,0	
037-2015 ^a	Любой (с учетом T ^b) [Any season (considering T ^b)]	2,8	2,2 – 1,9	1,8	–
	Любой (без учета T ^b) [Any season (without T ^b)]	3,5	3,0 – 2,7	2,4	1,5 – 1,2

^a Значения коэффициента преобразованы для удобства сравнения (см. текст статьи) [the coefficient values are converted for ease of comparison (see the text of the article)].

^b Символ «Т» означает температурное влияние, учет которого автоматически вводит сезонную поправку [the symbol “T” means a quantitative account of the temperature influence by a certain seasonal correction].

ния неопределенности измерений и оценивания соответствия нормативу. Эти концепции касаются выражения не только неопределенности результата прямого измерения, но и любой расчетной величины, включая среднегодовой уровень радона. В этой связи оба члена под корнем в (2) следует рассматривать как независимые компоненты суммарной неопределенности среднегодовой ЭРОА (или ОА) радона.

Связь между коэффициентами в (1) и (2) определяется достаточно просто, если принять $U_{\text{и}} = 0$, тогда

$$V_{Rn}(t) = 1 + K_V(t). \quad (3)$$

Используя (3), значения коэффициента временных вариаций в МУ 2.6.1.037-2015 были преобразованы для возможности их сравнения со значениями, представленными в предыдущих методических документах, – МУ 2.6.1.715-98 и МУ 2.6.1.2838-11 (см. табл. 1). Сопоставление данных таблицы 1 свидетельствует о том, что в МУ 2.6.1.2838-11 существенно занижена роль временных вариаций радона, а также отсутствует разница в надежности оценки соответствия нормативу по результатам краткосрочных и долгосрочных измерений, поскольку значения коэффициента постоянны. Тем не менее, МУ 2.6.1.2838-11 действуют до сих пор и являются более распространенным документом среди специалистов, чем МУ 2.6.1.037-2015.

Измерения радона в зданиях проводятся различными аккредитованными лабораториями с целью обеспечения норм радиационной безопасности. Однако декларируемая цель не достигается, поскольку фактическая польза от таких измерений заключается лишь в мониторинге доз

облучения населения в рамках статистической отчетности, а не идентификации зданий для устранения опасности и снижения риска, хотя именно это является главной задачей регулирования. Действительно, несмотря на проводящиеся уже более 20 лет измерения в зданиях субъектов Российской Федерации и периодически регистрируемые весьма высокие значения как ОА, так и ЭРОА радона [28], мероприятия по защите существующих зданий от радона (МЗР) практически не проводятся. По крайней мере, такой учет отсутствует.

Всего в России проведено около 800 тыс. измерений ОА и ЭРОА радона в зданиях [29] в подавляющем большинстве на основе мгновенных (не более 20 мин) тестов. Для более точной оценки среднегодовых значений было проведено еще около 60 тыс. долгосрочных измерений ОА радона, продолжительностью не менее 2 месяцев (иногда дважды в разные сезоны в одном помещении). Часть результатов долгосрочных измерений (не менее 23 тыс.) содержится в Федеральной базе данных Научно-исследовательского института радиационной гигиены (ФБун НИИРГ). Другая часть содержится в базе данных «Радон» под управлением Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены (ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России), специалистами которого разработана интерактивная радоновая карта с возможностью масштабирования от страны до отдельных зданий, которые расположены почти в 100 населенных пунктах в 28 регионах и 26 ЗАТО Российской Федерации [30]. Ранее на основе более обширных данных 4-ДОЗ была построена радоновая карта России [31] с ранжированием диапазонов ОА радона в зданиях по субъектам

Российской Федерации, что является пока очень слабой пространственной детализацией (при желательном разрешении хотя бы 10×10 км).

К сожалению, в России все еще не создан механизм мотивации местных властей, а также самих жителей и заинтересованных представителей бизнеса (владельцев зданий, риэлторов, специалистов по вентиляции и кондиционированию и т.п.) в проведении массовых измерений радона для выявления опасных зданий и МЗР на коммерческой основе. Кроме того, из-за использования мгновенных (экспрессных) измерений в сочетании с весьма заниженной ролью временных вариаций радона применение МУ 2.6.1.2838-11 явно не обеспечивает надежность контроля радона в зданиях, а длительное использование такой практики приводит к стагнации регулирования радона в стране.

В Европе массовые измерения радона начали проводиться в Швеции и Великобритании ориентировочно с 1990-х гг. [40] и постепенно охватили другие страны ЕС. В каждой стране ЕС были введены соответствующие НУ (100, 200 или 300 Бк/м³), ограничивающие среднегодовую ОА радона в зданиях, как сообщалось выше. Однако в течение прошедших десятилетий европейскому сообществу так и не удалось создать рациональный механизм контроля радона в зданиях, опирающийся на четкий количественный критерий оценки соответствия с заданной надежностью. Например, в исследовании [16] показано, что в современном международном регулировании роль временных вариаций радона занижена в несколько раз. Тем не менее, постепенно сформировался консенсус в том, что для надежной идентификации опасных зданий продолжительность измерений должна быть не менее 2 месяцев, согласно ISO 11665-8:2019 [32], что выглядит весьма неопределенным с точки зрения стандартизации [16]. Также предполагается, что для построения Европейского Атласа⁸ ОА радона в зданиях должны использоваться только результаты долгосрочных измерений. Однако для построения радоновой карты, а также оценки коллективных рисков могут использоваться результаты измерений любой длительности, как было показано в недавнем исследовании [33].

Таким образом, критерий оценки соответствия европейских зданий требованиям радоновой безопасности выражается весьма примитивно – результат долгосрочного измерения (продолжительностью не менее 2 месяцев) с учетом инструментальной неопределенности не должен превышать НУ, иначе необходимо проведение МЗР. Временная неопределенность не упоминается, поскольку ошибочно считается, что временные вариации радона не играют роли при оценке соответствия нормативу на основе долгосрочных измерений.

По нашему мнению, в европейском сообществе явно наблюдается нарушение в расстановке приоритетов, как в подходах к контролю радона в зданиях, так и в организации исследований для нужд стандартизации измерений [33], если судить по результатам недавно

завершившегося европейского метрологического проекта MetroRADON (<http://metroradon.eu>), а также не вполне адекватной постановке задач по изучению пространственно-временных вариаций радона в рамках текущего проекта RadoNorm (<https://www.radonorm.eu>). Действительно результаты ни одного из многочисленных исследований пространственно-временных вариаций, включая вышеупомянутые проекты [16, 33], практически не используются (не актуальны) в качестве количественных критериев, например, в международном стандарте ISO 11665-8:2019 [32], который регламентирует контроль радона в зданиях.

Согласно [31], до сих пор проведено не более 2 млн измерений, из них более 1 млн приходится только на Швецию и Великобританию вместе. В другом источнике [34] сообщается о примерно 1,2 млн измерений в странах ЕС. В любом случае проведенные измерения охватывают менее 1% зданий в Европе, согласно отчету МАГАТЭ за 2019 г. [35]. Соответственно, МЗР были проведены не более чем в 50 тыс. зданий (в основном в Швеции и Великобритании), если ориентироваться на этот источник информации [36], поскольку сложно найти более точные данные из-за отсутствия системы учета зданий в ЕС, в которых проводились МЗР. Хотя количество МЗР кажется достаточно большим, но такой объем мероприятий практически не влияет на снижение коллективного риска в Европе, обусловленного воздействием радона. Поэтому европейскую практику регулирования радона тоже нельзя считать эффективной.

По нашему мнению, одним из основных тормозящих факторов в европейском регулировании радона является неэффективный протокол измерений, когда не предусмотрен скрининг с использованием более коротких измерений (несколько дней). Этот факт также препятствует более широкому участию населения в обследовании собственных жилищ. Кроме того, механизм мотивации в проведении массовых тестов и МЗР на коммерческой основе тоже пока очень слабо развит, за исключением Великобритании и Швеции.

В США массовые измерения радона в зданиях начали проводиться в начале 1990-х гг. В отличие от Европы и России, американские коллеги, согласно опросу 1990 г. [37], сразу ориентировались на предпочтения жителей, 90% которых согласилось оплачивать и проводить краткосрочные измерения вместо долгосрочных тестов. По этой причине жители, собственники зданий, риэлторы и другие заинтересованные лица с каждым годом все активнее участвуют в проведении коммерческих тестов и МЗР. В этой связи американский протокол измерений является наиболее эффективным, поскольку предусматривает скрининг в виде краткосрочных измерений от 2 до 7 дней (преимущественно на основе угольного метода). Критерий оценки соответствия формулируется следующим образом – если уровень действия (148 Бк/м³) превышен, то должны проводиться повторные или более длительные измерения; если результаты измерений второго

⁸ Мониторинг радиоактивности окружающей среды. Объединенный исследовательский центр Европейской Комиссии [Radioactivity Environmental Monitoring. Joint Research Centre EC], <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration> (Дата обращения: 29.05.2023)

района тоже превышают уровень действия, тогда должны проводиться МЗР [5, 6].

Такой подход и развитие конкуренции между компаниями, выполняющими измерения и МЗР, а также информирование населения и своевременное усовершенствование законодательства способствовали быстрому росту индустрии регулирования радона в США. Например, уже к 2015 г. было протестировано более 23 млн зданий, из которых 1,2 млн успешно прошли реализацию МЗР [38]. Согласно плану действий США по борьбе с радоном⁹, к 2020 г. МЗР были проведены в 3,8 млн зданий, а к 2025 г. планируется увеличить охват таких зданий до 8 млн. Если использовать соотношение выше (измерения/МЗР), то к 2025 г. общее количество протестированных американских зданий (апартаментов) приблизится (или превысит) к 160 млн!!! Такое количество измерений и МЗР реально снижает риск от радона в США, причем это достигается без особых затрат из национального и местных бюджетов. Более того, благодаря огромному массиву краткосрочных измерений концентрации радона в зданиях (расположенных по всей стране), уже к 2000 г. была построена Радоновая карта США¹⁰ с достаточно высокой пространственной детализацией внутри каждого штата.

Однако, несмотря на очевидные преимущества американского регулирования, существует устойчивое недоверие европейского сообщества к результатам краткосрочных измерений [33]. Действительно недостатком американского подхода (как и европейского) является отсутствие строгого обоснования применяемого критерия оценки соответствия, который должен обеспечивать высокую надежность. Оба подхода до сих пор игнорируют фундаментальные концепции ISO/IEC [25–27], которые являются основой международной стандартизации. Применение этих концепций, например, в американском регулировании позволило бы существенно снизить расходы на обеспечение качества измерений. В этой связи в следующем разделе обсуждается применение концепций ISO/IEC, которые позволяют предложить рациональный и гармоничный критерий оценки соответствия, вполне охватывающий отличающиеся национальные традиции в регулировании радона.

Рациональный критерий оценки соответствия

Принципиальные отличия практики контроля радона в США, Европе и России существенно усложняют разработку согласованного международного стандарта, поэтому ни первую версию – ISO 11665-8:2012, ни вторую версию – ISO 11665-8:2019 [32] нельзя считать выражением компромиссного решения на международном уровне [16, 33]. Протоколы измерений в США и ЕС не учитывают временную (ключевую) компоненту неопределенности, что неприемлемо в рамках современной стандартизации измерений, поскольку отсутствует возможность контроля надежности принятия решений с учетом продолжительности измерений [16]. Поэтому подходы в США и Европе не являются рациональными, в отличие от подхода в России,

если ориентироваться на принципы оценки соответствия, предложенные в МУ 2.6.1.715 и МУ 2.6.1.037-2015.

Контроль при оценке соответствия помещения нормативу является рациональным [16], если учитываются все значимые источники неопределенности при принятии решения [25, 26]. Признаком рационального контроля служит возможность управления компромиссом между его стоимостью (продолжительность контроля, цена детекторов и их обслуживания, логистика и т.п.) и надежностью решения через оценивание: ложноположительной ошибки, или «ложной отбраковки» [27] – когда принято решение о превышении НУ, но на самом деле опасности нет, а также ложноотрицательной ошибки, или «ложной приемки» [27] – когда принято решение о непревышении НУ, но на самом деле опасность есть. Таким образом, соблюдение правил международной стандартизации в рамках таких фундаментальных концепций ISO/IEC, как «Неопределенность измерения» (measurement uncertainty) [25, 26] и «Оценка соответствия» (conformity assessment) [27], является основой для внедрения рациональной практики контроля радона в зданиях и гармоничного регулирования с учетом сложившихся традиций в разных странах.

На основе концепций ISO/IEC, а также ранее накопленного опыта и результатов тематических исследований [18–23] постепенно в России формировался критерий оценки соответствия с участием авторов этой статьи. Впервые критерий оценки, отвечающий правилам ISO/IEC, был опубликован в 2014 г. [24] для информирования заинтересованных коллег и сбора замечаний до ввода в действие МУ 2.6.1.037-2015. Однако, обладая более глубокими знаниями и опытом на сегодняшний день, можно утверждать, что предложенный в МУ 2.6.1.037-2015 критерий и связанные с ним процедуры контроля, безусловно, являются прогрессивными, но и имеют существенные недостатки, например:

- следуя традиции, допускаются мгновенные измерения, которые не обеспечивают надежность контроля, кроме этого, не вполне адекватно именуется как краткосрочные;
 - нормативный уровень традиционно снова задан в единицах ЭРОА, вместо ОА, что не соответствует мировой практике;
 - необоснованное усложнение критерия оценки соответствия из-за традиционного учета ЭРОА торона, вероятность обнаружения значимых уровней которого очень мала;
 - недостаточно совершенный алгоритм определения коэффициента (неопределенности) временных вариаций радона и небольшой объем статистических данных;
 - ошибочное внедрение учета температурного влияния, следуя традиционно сложившимся представлениям о возможности более точного прогноза среднегодового уровня с помощью сезонной поправки.
- Как уже обсуждалось в предыдущих разделах, мгновенные измерения, длительность которых обычно со-

⁹ Национальная радоновая стратегия в США на 2021–2025 годы [The US National Radon Action Plan 2021–2025], <http://www.radonleaders.org/sites/default/files/2022-01/NRAP-2021-2025-Action-Plan-508.pdf> (Дата обращения: 29.05.2023)

¹⁰ Национальный центр публикаций об окружающей среде в США [National Service Center for Environmental Publications (NSCEP)], <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P100W9GR.txt> (Дата обращения: 29.05.2023)

ставляет несколько минут (но не более нескольких часов), кроме России и нескольких стран СНГ, не применяются в других странах мира при контроле радона в зданиях. Это объясняется слишком большой и неконтролируемой неопределенностью оценки среднегодового уровня по результатам мгновенных измерений (см. рис. 1). Очевидно, что применение мгновенных измерений существенно снижает стоимость контроля благодаря экономии времени и транспортных расходов, поскольку специалисту не требуется посещать тестируемый объект повторно, но также очевидно, что не обеспечивается качество контроля. Более того, в этом случае сложнее исключить небрежность или умышленное нарушение процедуры контроля (например, интенсивное проветривание помещений до начала или во время инспекции), приводящее к увеличению решений «ложной приемки» при оценке соответствия. Действительно вероятность исключения влияния подобного «человеческого фактора» возрастает с увеличением продолжительности измерений, хотя бы начиная от 2 суток, согласно американской практике контроля. Важно снова подчеркнуть, что длительная практика контроля на основе мгновенных измерений, явно не обеспечивающих его надежность, приводит к стагнации всей системы регулирования радона в стране.

В связи с исключением мгновенных измерений возрастает актуальность пересмотра формата нормативного уровня в России, который целесообразно выражать в единицах ОА, как это принято во всех других странах мира. Действительно измерять ЭРОА в течение даже нескольких суток значительно сложнее, чем ОА радона. Ведь при измерениях ОА радона потребление энергии значительно ниже, а также не требуется периодической замены фильтра, как и профилактики системы принудительного пробоотбора, которая к тому же создает шум, мешающий жильцам или рабочему персоналу.

Другим предложением, идущим вразрез сложившейся в России формальной традиции, является отмена контроля ЭРОА торона при оценке соответствия помещения нормативу. Во-первых, в США и странах ЕС измерения ОА, а тем более ЭРОА торона проводятся крайне редко (обычно в рамках тематических исследований), поскольку отсутствует соответствующий норматив. Во-вторых, ни в Европе, включая Россию, ни в США не было зарегистрировано до сих пор (в течение почти 30 лет) повышенных значений ЭРОА торона в зданиях, хотя бы на уровне 5 Бк/м^3 (глобальный диапазон оценивается $0,04\text{--}2 \text{ Бк/м}^3$ при среднем около $0,3 \text{ Бк/м}^3$ [39]). Иногда встречаются сообщения об очень высокой ОА торона, например, на уровне $1000\text{--}2000 \text{ Бк/м}^3$ [60], однако уровни ЭРОА торона остаются незначительными, поскольку отсутствует связь между этими параметрами [39], в отличие от вполне определенной связи между ОА радона-222 и его ЭРОА, выражаемой величиной фактора равновесия при наиболее вероятном значении $0,4\text{--}0,5$ [14, 39]. В-третьих, проблема значимых уровней ЭРОА торона в зданиях приурочена исключительно к известным территориям, например, на побережьях Индии и Бразилии, а также Азовского моря с аномально высоким содержанием тория в монацитовых песках, выходящих на поверхность. На других территориях залежи ториевых руд не выходят на поверхность. Также «тороновая проблема» касалась нескольких провинций в Китае, где люди проживали не в зданиях, а в земляных

сооружениях. Таким образом, проблема значимых уровней ЭРОА торона в зданиях встречается крайне редко, тем более достаточно хорошо известны территории, для которых актуальна эта проблема. Кроме того, временные вариации ЭРОА торона в зданиях вообще не изучены. Поэтому пока преждевременно регламентировать измерения ЭРОА торона в зданиях в качестве рутинного контроля на национальном уровне.

Как сообщалось выше, действительно алгоритм, предложенный в МУ 2.6.1.037-2015 для определения коэффициента временных вариаций радона $K_V(t)$, весьма далек от совершенства. Этот алгоритм основан на оценке максимальных относительных отклонений измеренных ОА и ЭРОА радона от среднегодовых значений в зависимости от продолжительности измерений, а также режима эксплуатации и вентиляции экспериментальных комнат. Анализ проводился отдельно по каждой комнате, которые разделялись на 3 группы в зависимости от характера вентиляции, – стабильная, плавно изменяющаяся и нестабильная. Поскольку экспериментальных комнат было всего 10, на каждую из групп приходилось совсем небольшое количество годовых непрерывных измерений ОА и ЭРОА радона с периодом регистрации 3 ч, что не обеспечивало статистическую надежность оценок. Например, поэтому ради обеспечения надежности оценок при недостаточной мощности статистических данных, были намеренно завышены значения $K_V(t)$, которые после преобразования по формуле (3) приводятся в самой нижней строке таблицы 1 (без учета температурного влияния). В более поздних публикациях [13, 14] значения коэффициента снизились в отношении краткосрочных измерений, но при этом $K_V(t)$ увеличился для мгновенных и долгосрочных измерений. При дальнейшем сравнении следует учитывать, что в таблице 1 приводятся преобразованные значения $K_V(t)$, тем более относящиеся к измерениям ЭРОА радона.

Уточнение коэффициента $K_V(t)$, выражающего неопределенность временных вариаций радона, стало возможным благодаря более эффективному преобразованию исходных результатов годовых рядов непрерывных измерений с периодом регистрации 3 ч во временные ряды с большим периодом (или продолжительностью) измерений, что позволило увеличить объем статистических данных в анализируемых массивах. Впоследствии статистическая мощность исследования временных вариаций радона была значительно умножена благодаря включению 12 новых непрерывных годовых измерений, проведенных в Израиле [7], а также дополнительным усилиям по усовершенствованию алгоритма преобразования исходных данных годовых рядов непрерывных измерений, включая усовершенствованный подход обработки статистических массивов в совокупности [16], а не отдельно по каждой экспериментальной комнате.

Возвращаясь к таблице 1, кажется, что учет температурного влияния позволяет существенно снизить коэффициент (или неопределенность) временных вариаций радона. Однако следует признать, что закономерное влияние температуры было получено на крайне ограниченном экспериментальном материале, охватывающем всего несколько комнат с относительно стабильным воздухообменом. Более того, хорошо известно, что сезонная вариация радона в зданиях не подчиняется строгому правилу. Действительно, скорее всего, в большинстве зданий ОА радона в зимний период выше, чем летом [39–45]. Однако в остальной тре-

ти или даже другой половине зданий может наблюдаться как противоположная закономерность, так и отсутствие сезонной закономерности [7, 14, 46–52]. Поэтому учет температурного или сезонного влияния, вполне оправданно применяемый для уточнения коллективных рисков, нельзя использовать в принципе для уточнения индивидуального риска, а также в качестве критерия оценки соответствия. По крайней мере, польза при оценке соответствия от учета влияния какого-либо фактора (например, геологии, климата, назначения и этажности здания, режима эксплуатации помещения и самого здания, характера вентиляции и отопления, поведения жителей или персонала и т.п.) должна доказываться при поддержке удовлетворительного статистического материала в виде результатов непрерывных годовых измерений ОА радона в большом количестве зданий. Ожидаемая польза от учета влияния того или иного фактора или их совокупности может быть выражена в снижении коэффициента (неопределенности) временных вариаций радона. Если снижения неопределенности при оценке соответствия не достигается, то учет влияния исследуемого фактора на поведение радона не имеет смысла.

Опираясь на соображения выше, рациональный критерий для оценки соответствия помещения нормативу, обеспечивающий заданную надежность принятия решений (обычно не менее 95%, что гарантирует не более 5% решений «ложной приемки») в случае как краткосрочных, так и долгосрочных тестов, выражается следующим образом [16]:

$$C(t) \cdot \left[1 + \sqrt{U_V(t)^2 + U_H^2} \right] < C_{HY}, \quad (4)$$

где $C(t)$ – ОА радона (или ЭРОА, умноженная на 2), измеренная за период t , продолжительность которого должна быть не менее 2 суток, Бк/м³;

C_{HY} – нормативный уровень, ограничивающий средне-годовую ОА радона в зданиях, Бк/м³;

U_H – относительная инструментальная неопределенность (с коэффициентом охвата 2), которая учитывает все основные источники неопределенности (в основном случайную и систематическую или калибровочную компоненты), связанные с процедурой измерения ОА (или ЭРОА) независимо от происхождения и поведения радона во времени и пространстве (более детальная информация приводится в последнем разделе);

$U_V(t)$ – относительная неопределенность поведения радона во времени или временная неопределенность радона в зданиях определяется как значение 95-й процентиля в распределении всех относительных отклонений $D_{ij}(t)$ между измеренными значениями среднегодовой ОА радона и $C_{ij}(t)$: $D_{ij}(t) = C_{ij}^{cr} / C_{ij}(t) - 1$ ($i=1...M$; $j=1...N$), в представительной выборке из N зданий (помещений). В каждом из N зданий (помещений) проводится мониторинг – непрерывные измерения ОА радона с интервалом регистрации (интегрирования) 1 или 3 ч в течение 1 года ($M=8760$ или 2920 соответственно), что обеспечивает хорошую статистику данных среди массивов $D_{ij}(t)$ для любой продолжительности измерений t .

Алгоритм определения $U_V(t)$ более детально обсуждается в [16]. Здесь подробнее обсудим оригинальный метод преобразования исходных данных мониторинга, позволяющий создавать мощные массивы статистиче-

ских данных [16]. Итак, $C_i(t)$ представляет собой набор преобразованных массивов данных исходного мониторинга в одном и том же помещении, которые отличаются интервалом интегрирования t , например, от 2 суток до 11 месяцев. Каждый из новых массивов включает такое же количество данных ($i=1...M$), как исходный ряд мониторинга. В качестве примера возьмем исходный годовой ряд данных мониторинга с интервалом регистрации (интегрирования) 3 ч ($M = 365 \times 24 / 3 = 2920$), который преобразуем в мониторинг с интервалом интегрирования 2 сут, получая дополнительный массив данных $C_i(t=2 \text{ сут})$. Пример схемы такого преобразования через «скользящее среднее» со сдвигом 3 ч приводится на рисунке 2.

Таким образом, только один исходный годовой ряд непрерывных измерений (мониторинга) позволяет полу-

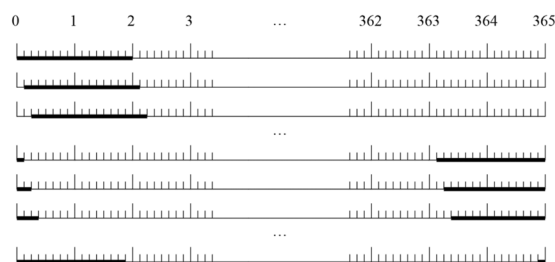


Рис. 2. Схема преобразования данных исходного годового мониторинга с интервалом регистрации (интегрирования) 3 ч в годовой ряд данных с интервалом интегрирования 2 сут (жирные отрезки)

[Fig 2.] The scheme for converting the initial annual monitoring with a registration (integration) interval of 3 hours into monitoring with the integration interval of 2 days (bold segments)]

чить обширные массивы значений $D_i(t)$, суммарное количество которых L определяется по формуле:

$$L = M \cdot I, \quad (5)$$

где M – количество данных в исходном ряду мониторинга;

I – количество преобразованных рядов данных (новых массивов) с отличающимся интервалом интегрирования.

Традиционно внимание международного метрологического сообщества фокусировалось на изучении и верификации только инструментальной неопределенности U_H (в частности, точности калибровки средств измерений), в то время как временная (ключевая) неопределенность $U_V(t)$ не изучалась вследствие ее подмены такими суррогатными параметрами, как сезонный поправочный фактор (Seasonal Correction Factor) и коэффициент вариаций (Coefficient of Variation) [16]. К сожалению, такая подмена в течение десятилетий привела к занижению роли временных вариаций радона в международном регулировании, когда на самом деле $U_V(t)$ существенно больше U_H в случае не только краткосрочных, но и долгосрочных тестов, если их продолжительность не более 6–8 месяцев [7, 13, 14, 16]. Параметр U_H в формуле критерия (4) можно считать достаточно изученным, тем более его значения являются обязательной характеристикой того или иного средства (или метода) измерений, которые подлежат согласованию (при регистрации в Государственном реестре

средств измерений) и периодической поверке через национальные метрологические службы. Поэтому внимание метрологического сообщества в рамках стандартизации измерений радона в большей степени целесообразно фокусировать на более значимом источнике неопределенности, т.е. параметре $U_{\lambda}(t)$ вместо U_{μ} .

В этой связи актуальной задачей является изучение именно временной неопределенности $U_{\lambda}(t)$ с учетом продолжительности измерений и влияния разнообразных факторов на поведение радона во времени. Из описания выше параметра $U_{\lambda}(t)$ ясно, что оценка временной неопределенности основана на статистическом анализе массивов отклонений ОА радона в помещениях большого количества зданий от среднегодовых уровней, измеренных в разнообразных условиях. Это очень простой статистический подход в оценке $U_{\lambda}(t)$, однако он позволяет учитывать влияние всех антропогенных и природных факторов (в том числе сезонных) на временную неопределенность при условии обеспечения репрезентативной выборки зданий и помещений, в которых будут проводиться мониторинговые исследования.

На сегодняшний день мы располагаем относительно небольшим набором непрерывных годовых измерений ОА радона в России (6 рядов мониторинга в 5 зданиях) и Израиле (12 рядов мониторинга в 9 зданиях), хотя анализируемый массив отклонений $Dij(t)$ включает $18 \times 2920 \times 23 = 1\,208\,880$ значений [16], согласно (5). Столь значительный объем статистических данных при небольшом количестве годовых рядов ($6 + 12 = 18$) достигается благодаря оригинальному методу преобразования исходных рядов данных [16], который обсуждался выше. В этой

связи традиционные подходы в исследовании временных вариаций радона в зданиях уступают на несколько порядков, если сопоставлять массивы статистических данных (отклонения $Dij(t)$), аккумулируемые в 1 экспериментальной комнате. Сравнительный анализ объемов экспериментальных данных в [16] показывает, что, например, исследование в Финляндии в 2016 г. [53], охватывавшее 326 частных домов или экспериментальных комнат (сокращенно на англ. – ER), позволило получить только 46 944 отклонений, а исследование в США в 2005 г. [54], охватывавшее 75 частных домов (ER), позволило получить лишь 1202 отклонений. Для удобства сравнения самих временных вариаций радона данные исследований в Финляндии и США были конвертированы в значения $U_{\lambda}(t)$ в соответствии с алгоритмом [16]. Дополнительно были конвертированы с помощью (3) значения коэффициента вариации из МУ 2.6.1.715-98, относящиеся к теплому сезону года (см. табл. 1). Таким образом, на рисунке 3 приводятся все имеющиеся у нас значения $U_{\lambda}(t)$, в том числе полученные путем конвертации данных, которые были опубликованы другими авторами. Данные МУ 2.6.1.037-2015 не показаны на этом рисунке, поскольку исходные экспериментальные результаты, полученные в зданиях России, позже обрабатывались с помощью более совершенного алгоритма [16]. В итоге имеющиеся ориентировочные значения временной неопределенности (вполне надежные в интервале продолжительности измерений от 6 до 12 месяцев) можно использовать для стандартизации измерений радона в помещениях при консервативном подходе.

Консервативный подход в регулировании означает намеренное завышение неопределенности с целью обеспе-

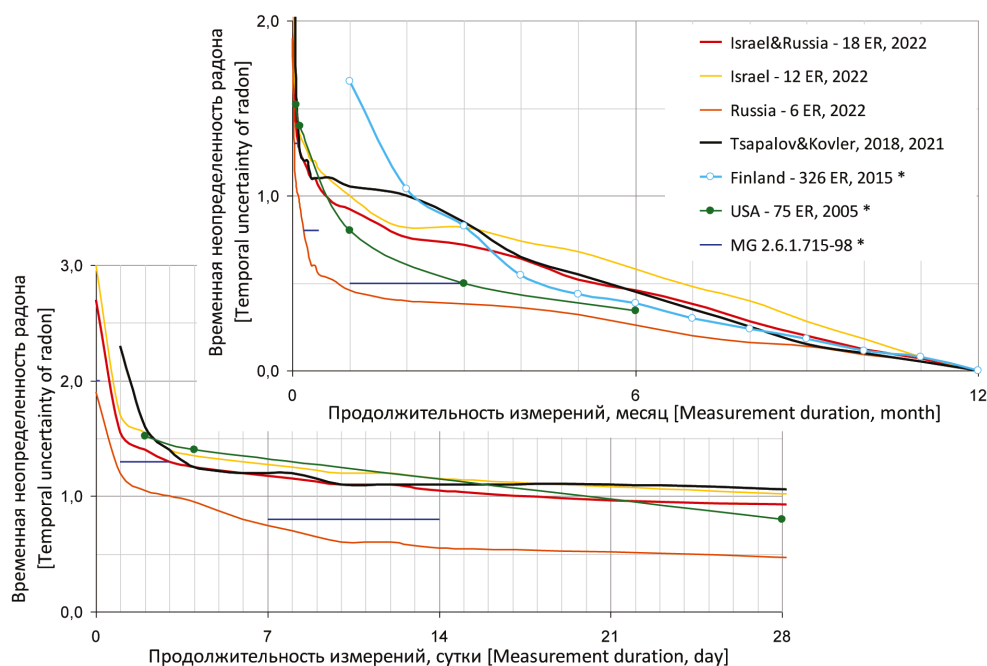


Рис. 3. Ориентировочные значения временной неопределенности поведения радона в зданиях, полученные по данным из разных источников (* – преобразованные данные [16, 53, 54]); черная кривая – консервативные (табличные) значения, которые были опубликованы в 2018 г. [13, 14] и подтверждены в 2021 [7] и 2022 гг. [16]

[Fig 3. Indicative values of temporal uncertainty of indoor radon obtained from different sources (* – converted data [16, 53, 54]); black curve – conservative (tabulated) values that were published in 2018 [13, 14] and confirmed in 2021 [7] and 2022 [16]]

чения надежной оценки соответствия нормативу в условиях недостаточной информации об основных компонентах неопределенности (например, вследствие низкой репрезентативности или мощности статистических данных). Поэтому для более точной (репрезентативной) оценки временной неопределенности радона необходимо провести как можно больше непрерывных годовых измерений в разнообразных зданиях, расположенных в разных регионах или странах (с отличающимися геологией и климатом, архитектурным стилем и т.п.). Кроме того, другим важным условием репрезентативности мониторинговых исследований является адекватный выбор экспериментальных помещений и зданий, требования к которым достаточно четко определены в [16]. С увеличением разнообразия таких исследований при контролируемых условиях (охватывающих наиболее значимые факторы влияния) возрастает вероятность добиться снижения неопределенности временных вариаций радона в критерии (4), используя учет влияния одного или сразу нескольких факторов (например, из списка параметров климата, геологии, комнаты и самого здания), если они будут демонстрировать мощную корреляцию с $U_V(t)$. По нашим оценкам, проведение (при контролируемых условиях) мониторинговых исследований в 200–300 разных зданиях [16] на территории России и/или других стран позволит получить статистически репрезентативный массив отклонений $D_{ij}(t)$ для верификации и уточнения консервативных значений временной неопределенности $U_V(t)$.

Принцип эффективной стратегии измерений

Очевидно, что наиболее надежную оценку соответствия любого помещения требованиям безопасности можно получить, проводя измерения непрерывно в течение 1 года. В то же время ОА радона в большинстве зданий на планете (глобальный уровень среднего геометрического) составляет около 30 Бк/м³ [39], что значительно ниже НУ, который в странах с повышенным уровнем радона в зданиях обычно тоже выше. Например, взвешенное по численности населения субъектов РФ среднее арифметическое ЭРОА радона в зданиях составляет около 27 Бк/м³ [55] или 54 Бк/м³ ОА радона. Соответственно, при геометрическом стандартном отклонении (GSD) в диапазоне от 2,5 до 2,9 [55, 56] среднее геометрическое ОА радона в России составляет около 35 Бк/м³ (или около 41 Бк/м³ [29]), в то время как НУ = 200 (или 400) Бк/м³ для проектируемых (или существующих) зданий в единицах ОА без учета вклада торона. В этих реалиях измерение относительно низкой активности (по сравнению с НУ) с высокой точностью в течение всего года или даже нескольких месяцев выглядит как нерациональные затраты времени и финансов. Однако чем короче тест, тем выше неопределенность принятия решения о соответствии. В то же время из-за низкого уровня содержания радона в большинстве зданий даже высокая неопределенность оценки среднегодовой ОА радона на уровне 150% (например, 35 Бк/м³ + 52 Бк/м³ < НУ) будет удовлетворительной в большинстве случаев, но эта неопределенность должна быть надежно оценена. Лишь в относительно редких случаях, когда высокая неопределенность краткосрочного теста (от 2 до 7 дней) не позволяет надежно оценить соответствие, решение следует принимать на основе более надежных долгосрочных тестов. Такой двухэтапный под-

ход аналогичен американскому (см. выше), но лишь с тем важным отличием, что критерий соответствия должен иметь твердое научное обоснование с количественной оценкой временной неопределенности радона в зданиях, учитывающей продолжительность измерений. Таким образом, эффективная стратегия измерений предусматривает следующую последовательность контроля с применением критерия (4): (i) проведение краткосрочных измерений (от 2 до 7 дней), а в случае превышения НУ (ii) проведение долгосрочных измерений (примерно от 3 до 10 месяцев); если и в этом случае НУ превышен, то проводятся МЗР. В США накоплен значительный опыт проведения МЗР, который вполне может быть адаптирован в других странах, включая Россию.

Для территорий, где велика доля зданий с повышенной ОА радона, может быть введен дополнительный критерий выбора оптимальной продолжительности на первом этапе измерений, поскольку из-за повышенного содержания радона в зданиях существенная доля краткосрочных тестов может превышать НУ, соответственно, потребуется частое проведение второго этапа измерений. Поэтому для экономии ресурсов целесообразно увеличивать продолжительность измерений на первом этапе. Расчет оптимальной продолжительности измерений первого этапа может быть проведен путем такого же моделирования, как в исследовании [33] на основе метода Монте-Карло, но при отличающемся наборе входных параметров, включающих среднее арифметическое и GSD ОА радона в зданиях, а также дополнительные значения C_{HV} , U_H и $U_V(t)$. Подобная перспектива лишь усиливает актуальность верификации коэффициента временных вариаций радона.

В рамках эффективной стратегии измерений предлагается также учитывать влияние межгодовых вариаций ОА радона в зданиях, которые обусловлены долгосрочными вариациями климата, поведения обитателей, а также деградацией или восстановлением перекрытий и фундамента здания, включая подземные коммуникации. Однако накопленные в течение многих лет данные указывают, что в большинстве случаев межгодовые вариации ОА радона незначительные, т.к. не превышают 15–20% [57], что может служить ориентиром максимально достижимой точности в рамках критерия (4). Тем не менее, полезно включить в процедуру оценки соответствия зданий рекомендацию о проведении повторного контроля радона через каждые 3–10 лет в зависимости, например, от ранга потенциальной радоноопасности территорий [10].

Применяя критерий (4), контроль помещений можно проводить в любое время (без предварительной подготовки) как при нормальной эксплуатации зданий с работающей в штатном режиме вентиляции (естественной или принудительной), так и в условиях ограниченной вентиляции, например, при приеме в эксплуатацию, когда в незаселенном здании постоянно закрыты все окна и двери. В этой связи в таблице 2 приводятся значения $U_V(t)$, зависящие не только от продолжительности измерений, но и от режима эксплуатации помещений. Режим «Нормальный» соответствует использованию помещений без каких-либо ограничений при работе вентиляции в штатном режиме. Режим «Ограниченный» соответствует использованию помещений при постоянно закрытых дверях и окнах с присутствием или отсутствием людей, что очевидно приводит

к снижению интенсивности вентиляции и, соответственно, временных вариаций радона, содержание которого, скорее всего, увеличивается. Дополнительно в таблице 2 приводятся рассчитанные с помощью критерия (4) контрольные значения ОА радона (или уровни действия), выше которых, вероятно, будет превышен заданный нормативный уровень $C_{н\text{у}}$ при заданных значениях $U_{\text{и}}$.

Необходимо уточнить, что значения $U_{\text{и}}(t)$, относящиеся к режиму «Нормальный», соответствуют консервативным значениям, которые были опубликованы еще в 2018 г. [13, 14] и подтверждены в 2021 г. [7]. Как видно на рисунке

3, эти значения очень близки (при относительно небольшом расхождении в интервале продолжительности измерений после 2-й недели до 4-го месяца) совокупным значениям, полученным на основе данных всех 18 мониторинговых исследований в России и Израиле, которые были опубликованы в 2022 г. [16]. В то же время значения $U_{\text{и}}(t)$, относящиеся к режиму «ограниченный», в среднем в 1,5–2,0 раза меньше вследствие ограниченной вентиляции в 6 экспериментальных помещениях, которые располагались в зданиях на территории России [7, 14, 16]. Подробный анализ, объясняющий различие вентиляции

Таблица 2

Значения неопределенности временных вариаций радона [7, 13, 14, 16] и ОА радона (выше которой будет превышен заданный нормативный уровень) в зависимости от продолжительности и режима измерений

[Table 2]

The temporal uncertainty of radon [7, 13, 14, 16] and its concentrations (above which the specified reference level will be exceeded) depending on the duration and measurement mode

Длительность измерения [Measurement duration]	Неопределенность временных вариаций радона $U_{\text{и}}(t)$ [Temporal Uncertainty of radon $U_{\text{и}}(t)$]			Контрольная ОА радона, Бк/м³, при нормальном / ограниченном режимах эксплуатации [Action level, Bq/m³, under normal / closed modes]			Инструментальная неопределенность $U_{\text{и}}$ [Instrumental Uncertainty $U_{\text{и}}$]
	Режим эксплуатации [Operating mode]		Нормативный уровень, Бк/м³ [Reference level, Bq/m³]				
	Нормальный [Normal]	Ограниченный [Closed]	200	300	400		
Сутки [Day]	2	1,60	1,05	75 / 94	113 / 141	151 / 188	0,40
	3	1,40	1,00	81 / 96	122 / 144	163 / 193	
	4	1,25	0,95	86 / 98	130 / 148	173 / 197	
	5	1,20	0,90	88 / 101	132 / 151	177 / 202	
	6	1,20	0,80	88 / 106	132 / 158	177 / 211	0,30
	7	1,20	0,75	89 / 111	134 / 166	179 / 221	
	8	1,20	0,70	89 / 114	134 / 170	179 / 227	
	10	1,10	0,65	94 / 119	142 / 179	189 / 238	
	12	1,10	0,60	94 / 123	142 / 184	189 / 245	0,20
	14	1,10	0,55	94 / 126	142 / 189	189 / 252	
20	1,10	0,50	94 / 130	142 / 195	189 / 260		
Месяц [Month]	1	1,05	0,45	97 / 136	146 / 203	194 / 271	0,15
	2	1,00	0,40	99 / 140	149 / 210	199 / 280	
	3	0,85	0,38	107 / 142	161 / 213	215 / 284	
	4	0,65	0,36	120 / 144	180 / 216	240 / 288	
	5	0,55	0,32	127 / 148	191 / 222	255 / 296	
	6	0,45	0,26	136 / 154	203 / 231	271 / 308	
	7	0,35	0,20	145 / 160	217 / 240	290 / 320	
	8	0,25	0,16	155 / 164	232 / 246	310 / 328	
	9	0,17	0,14	163 / 166	245 / 249	326 / 332	
	10	0,10	0,09	169 / 170	255 / 255	339 / 340	
	11	0,05	0,05	173 / 173	259 / 259	345 / 345	
	12	0,00	0,00	174 / 174	261 / 261	348 / 348	

в 12 экспериментальных помещениях в Израиле и 6 экспериментальных помещениях в России, приводится в [16]. Таким образом, значения $U_V(t)$ в колонке «ограниченный» (режим эксплуатации) предлагается использовать при оценке соответствия нормативу: тех помещений, двери и окна которых постоянно закрыты (не только во время измерений), но при этом могут присутствовать или отсутствовать люди, а также новых незаселенных зданий перед вводом в эксплуатацию. Важно понимать, что намеренное ограничение вентиляции, хотя и способствует снижению неопределенности временных вариаций радона, но приводит к неконтролируемому увеличению ОА радона, соответственно, возрастает вероятность решений «ложной отбраковки». В итоге надежность решения о соответствии может существенно снижаться. Поэтому рекомендуется по мере возможности не прибегать к намеренному ограничению вентиляции во время контроля радона в зданиях, тем более что исследования неопределенности временных вариаций радона в основном проводятся в условиях нормальной эксплуатации зданий и обычного вентиляционного режима.

Таким образом, предложенный критерий (4), а также значения неопределенности временных вариаций радона в таблице 2 позволяют проводить оценку соответствия на основе оптимальной и гибкой стратегии измерений с разной продолжительностью, но не менее 2 суток, обеспечивая на сегодняшний день наибольшую эффективность контроля и надежность решения о соответствии зданий требованиям радоновой безопасности.

Сравнение международного опыта контроля радона в зданиях указывает на безусловное преимущество необычной и весьма прогрессивной практики в США по сравнению с Европой, включая Россию, где контроль радона организован по традиционному принципу обеспечения радиационной безопасности, когда контролерами являются только специалисты. Поэтому внедрение эффективной стратегии измерений радона будет способствовать широкой вовлеченности населения в процесс контроля, как в США. В этой связи со стороны федеральных и местных регуляторов представляются весьма полезными, прежде всего, организация учебных программ и информирование администраций и населения об опасности радона и других загрязнителей в воздухе жилищ и производственных зданий, где люди проводят почти 90% времени жизни [3]. Кроме того, очевидно, актуальна разработка и внедрение адекватной методики измерений в рамках рационального критерия оценки соответствия, обеспечивающая не только надежность контроля радона в зданиях, но и применение разнообразных по цене и точности средств измерений (и пробоотбора), которые могли бы использоваться как специалистами, так и любыми заинтересованными лицами, включая самих жителей, владельцев зданий, риэлторов, специалистов по вентиляции и отоплению, школьников и их педагогов с учетом бурно развивающихся во всем мире проектов Citizen Science («гражданской науки») [58].

Требования к средствам измерений

Анализ данных на рисунке 3 показывает, что наиболее резкое снижение временной неопределенности наблюдается в интервале продолжительности измерений до 2 дней. Затем в интервале от 2 до 7 дней снижение менее

резкое, а в интервале продолжительности измерений более 14 дней темп снижения временной неопределенности становится очень слабым. Это важное экспериментальное наблюдение объясняет целесообразность проведения краткосрочных измерений в интервале от 2 (а лучше от 4) до 7 дней. Как видно на рисунке 3 и обсуждалось ранее, мгновенные измерения характеризуются слишком высокой и неконтролируемой временной неопределенностью (более 200%), поэтому они не могут применяться в принципе для оценки соответствия, согласно мировой практике.

Поскольку продолжительность измерений должна превышать 2 суток, снижается актуальность использования радоновых приборов с высокой чувствительностью, увеличивающей их стоимость. Действительно, при продолжительности измерений 2 дня $U_V(t) > 1,0$ (100%), а при продолжительности до 7 дней $U_V(t) > 0,7$ (70%). Поэтому надежность оценки соответствия в режиме краткосрочных измерений практически не снижается, даже при $U_{II} = 0,4$ (40%) в рамках предложенного критерия (4), например, $\sqrt{1,0^2 + 0,4^2} \sim 1,0$. Очевидно, с увеличением продолжительности измерений случайная (рассчитываемая) компонента неопределенности U_{II} будет снижаться, полностью утрачивая роль, например, при длительности теста более 1 или нескольких недель. В этом случае величина U_{II} будет определяться только значением систематической (калибровочной) компоненты неопределенности. В этой связи важно отметить, что такая распространенная характеристика средств измерений, как минимально измеряемая активность, теряет смысл, поскольку в рамках рационального критерия соответствия нет необходимости измерять низкую активность с высокой точностью, тем более в режиме краткосрочных измерений. В режиме долгосрочных измерений минимально измеряемая активность будет стремиться к нулю (либо к уровню неустраняемой активности за счет влияния фона или других помех) с увеличением продолжительности теста, если исключить систематическую компоненту. Поэтому, помимо (или даже вместо) стремления уменьшить минимально измеряемую активность, производителям измерительной техники, особенно профессиональных средств измерений радона, было бы весьма полезно рекомендовать выводить в качестве результата измерения не только значение $C(t)$, но и значение U_{II} , таким образом, внедряя концепции ISO/IEC [25, 26]. Индикация этих параметров очень удобна как при анализе результата теста по формуле (4), так и при аттестации (или поверке) устройств, особенно в процессе измерений. Для расчета текущих значений $C(t)$ и U_{II} достаточно определить 2 основных метрологических параметра – чувствительность и фон средства измерения ОА или ЭРОА радона, используя следующий принцип оценки:

$$C(t) = \frac{N/t - N_\phi/t_\phi}{\varepsilon} = \frac{n(t) - n_\phi(t_\phi)}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где $C(t)$ – расчетная ОА (или ЭРОА) радона за время измерения t , Бк/м³;

N или $n(t)$ – количество или скорость счета импульсов (1/с), которые зарегистрированы за время измерения ОА (или ЭРОА) радона;

N_ϕ или $n_\phi(t_\phi)$ – количество или скорость счета импульсов (1/с), которые зарегистрированы за время измерения фона t_ϕ , согласно инструкции производителя;

ε – чувствительность средства измерений или калибровочный фактор, выражаемый через имп/с на Бк/м³ или 1/(с·Бк/м³).

Неопределенность расчета $u(C)$ можно вычислить, применяя в отношении (6) фундаментальные правила ISO/IEC для оценивания неопределенности измерений [25]:

$$u(C) = \sqrt{\frac{u^2(n) + u^2(n_{\phi})}{\varepsilon^2} + u_{rel}^2(\varepsilon) \cdot \left(\frac{n - n_{\phi}}{\varepsilon}\right)^2} =$$

$$= C \cdot \sqrt{\frac{u^2(n) + u^2(n_{\phi})}{(n - n_{\phi})^2} + u_{rel}^2(\varepsilon)}, \quad (7)$$

где $u(\dots)$ – неопределенность параметра в скобках, выраженная в абсолютных единицах, а $u_{rel}(\dots)$ выражена в относительных единицах. Отметим, что уравнения (7) согласуются с примерами в стандартах серии ISO 11665 [59], которые регламентируют измерения ОА радона разными методами.

Если распределение регистрируемых импульсов подчиняется нормальному закону, что справедливо при измерении ионизирующих излучений, то можно использовать следующую связь [25]:

$$u(n) = \frac{u(N)}{t} = \frac{\sqrt{N}}{t}, \quad (8)$$

тогда (7) преобразуется к виду, также учитывая $U_{II} = k \cdot u(C)/C$:

$$U_{II} = k \cdot \sqrt{\frac{n/t + n_{\phi}/t_{\phi}}{(n - n_{\phi})^2} + u_{rel}^2(\varepsilon)}, \quad (9)$$

где k – коэффициент охвата, равный 2.

Кстати, первое слагаемое под корнем в (9) в виде дроби выражает случайную составляющую инструментальной неопределенности, которая зависит от продолжительности измерений. Последнее слагаемое под корнем в (9) выражает систематическую (или калибровочную) составляющую инструментальной неопределенности. Случайная и систематическая компоненты U_{II} уже упоминались выше.

Также целесообразно обратить внимание производителей целесообразной техники на важность индикации параметра N (или n) для определения значений основных метрологических величин – n_{ϕ} , ε , а также U_{II} , которые являются отличительными характеристиками средств измерений радона независимо от принципа детектирования и процедуры измерений.

Учитывая соображения выше, в таблице 2 показано, как рационально управлять величиной U_{II} , практически не снижая надежность оценки соответствия, когда вполне допустимо, что значения этой неопределенности могут быть в несколько раз больше при краткосрочных измерениях, по сравнению с долгосрочными. Этот важный факт не только адресован производителям измерительной техники и национальным метрологическим институтам, но и легализует участие непрофессионалов в контроле

радона на этапе краткосрочных измерений (скрининга). Действительно требования, связанные с контролем U_{II} в отношении наиболее востребованных краткосрочных измерений, должны быть менее жесткими, чем для долгосрочных измерений. В этой связи целесообразно рекомендовать пользователю самостоятельно контролировать качество своих измерительных устройств, но один или несколько из них следует периодически поверять в национальной метрологической службе. Кроме того, внедрение online-технологий в измерения радона позволяет существенно повысить качество контроля радона в зданиях. Например, даже школьники успешно справляются с измерениями ОА радона в своих жилищах под управлением online-системы «RadonTest» [58].

Существующий в России парк средств измерений радона отличается высокой стоимостью из-за высокой чувствительности устройств, в основном предназначенных для проведения мгновенных тестов, которые не обеспечивают надежную оценку соответствия, что подробно обсуждалось выше. В этой связи особенностью рационального критерия (4) является тот факт, что допускается использование любых методов и средств измерений ОА и ЭРОА радона, даже с самой низкой чувствительностью, просто в этом случае требуется достаточно большая продолжительность теста. Такая важная особенность мотивирует производить более широкую номенклатуру средств измерений, фокусируясь на более дешевых устройствах, что, очевидно, будет способствовать снижению стоимости контроля радона в зданиях с одновременным увеличением массовости и надежности тестов.

Выводы

1. Анализ международной практики контроля радона в зданиях, включая критический обзор методов оценки соответствия, применяемых в России, позволяет сделать выбор и обосновать применение рационального критерия оценки соответствия помещений требованиям норм безопасности в рамках концепций ISO/IEC. Предложенный критерий учитывает основные неопределенности измерений, обусловленные временными вариациями радона и инструментальной погрешностью. Это обеспечивает гибкость и оптимальный выбор продолжительности измерений с учетом режима эксплуатации зданий и решаемых задач регулирования радиационной безопасности, обеспечивая соблюдение надежности принятия решения о соответствии нормативу (не менее 95%).

2. Результаты обобщения экспериментальных данных по временной (ключевой) неопределенности поведения радона в зданиях, а также другие материалы статьи предлагается использовать для актуализации и разработки методических указаний взамен действующим МУ 2.6.1.2838-11 и МУ 2.6.1.037-2015. Рациональный контроль радона в зданиях сначала может обеспечиваться на основе консервативного подхода, поскольку для верификации и уточнения имеющихся ориентировочных значений неопределенности временных вариаций радона необходимо проведение дополнительных исследований поведения радона в 200–300 зданиях, расположенных в разных регионах России.

3. На основе рационального критерия предложен принцип эффективной стратегии измерений (оптимизации), способной обеспечить массовый и надежный контроль ра-

дона в зданиях через участие не только специалистов, но и самого населения благодаря открывающейся возможности применения простых методов и недорогих средств измерений радона. Обоснование такой возможности вытекает из анализа требований к средствам измерений в рамках рационального критерия оценки соответствия.

4. Представляется целесообразным использовать предложенный принцип оптимизации контроля радона в зданиях при разработке и совершенствовании национальных и региональных программ по снижению радонового риска в РФ.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Цапалов А.А. – разработка концепции и структуры обзорной статьи, написание текста, а также координация работы над статьей.

Киселев С.М. – обзор нормативно-методических документов, написание текста и редактирование статьи.

Ковлер К.Л. – обзор зарубежной литературы и редактирование статьи.

Микляев П.С. – написание текста и редактирование статьи.

Петрова Т.Б. – обзор отечественной литературы и редактирование статьи.

Жуковский М.В. – редактирование разделов статьи.

Ярмошенко И.В. – редактирование разделов статьи.

Маренный А.М. – редактирование статьи по части организации измерений.

Тутельян О.Е. – согласие нести ответственность за все аспекты статьи.

Кувшинников С.И. – согласие нести ответственность за все аспекты статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование отсутствовало.

Литература

1. UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly United Nations: Vol. 1, Annex B, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
2. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году // Справочник. СПб., 2022. 72 с. URL: http://niirg.ru/PDF/inf_sbor/2021.pdf. (Дата обращения: 29.05.2023).
3. Cincinelli A., Martellini T. Indoor air quality and health // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 14, No 11. P. 1286.
4. WHO, Housing and Health Guidelines. Geneva: World Health Organization, 2018. ISBN 978-92-4-155037-6.
5. ANSI/AARST MAH. Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes. 2019. URL: www.radonstandards.us (Дата обращения: 29.05.2023).
6. US EPA. Home buyer's and seller's guide to radon. United States Environmental Protection Agency; 2018 EPA 402/K-12/002. URL: www.epa.gov/radon (Дата обращения: 29.05.2023).
7. Tsapalov A., Kovler K. Studying temporal variations of indoor radon as a vital step towards rational and harmonized international regulation // Environmental Challenges. 2021. No. 4. P. 1002. DOI:10.1016/j.envc.2021.100204.
8. EU-BSS, Council Directive 2013/59/Euratom. Laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation and repealing directives 89/618, 90/641, 96/29, 97/43 and 2003/122/Euratom // Official Journal of the European Union, L13. 2014.
9. Tryggve R. Analysis of Radon Levels in Swedish Dwellings and Workplaces, Research Report. Swedish Radiation Safety Authority, Stockholm, 2021. ISSN: 2000-0456.
10. Petermann E., Bossew P., Hoffmann B. Radon hazard vs. radon risk – on the effectiveness of radon priority areas // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. No. 244-245. P. 106833.
11. ICRP. Radiological protection against radon exposure. The international commission on radiological protection. 2014. ICRP publication 126 // Annals of the ICRP. 2014. Vol. 43, No 3.
12. ICRP. Protection against Radon-222 at home and at work. The international commission on radiological protection. 1993. ICRP publication 65 // Annals of the ICRP. 1993. Vol. 23, No. 2. P. 1-45. ISSN 0146-6453.
13. Tsapalov A., Kovler K. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. No. 183. P. 59–72.
14. Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М. и др. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 2. Экспериментальная оценка неопределенности временных вариаций радона // Радиационная гигиена. 2018. Т.11, № 1. С. 64–79.
15. Yarmoshenko I., Zhukovsky M., Onishchenko A. et al. Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 232, No. 1. P. 106575. DOI:10.1016/j.jenvrad.2021.106575.
16. Tsapalov A., Kovler K. Temporal uncertainty versus coefficient of variation for rational regulation of indoor radon // Indoor Air. 2022. P. 32:e13098. DOI:10.1111/ina.13098.
17. Becker R., Haquin G., Kovler K. Air change rates and radon accumulation in rooms with various levels of window and door closure // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 38, No. 3. P. 234–261.
18. Онищенко А.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В. Влияние временных вариаций уровней радона и погрешностей измерений на оценку средних сезонных значений объемной активности радона в помещении // АНРИ. 2013. № 3(74). С. 2-12.
19. Цапалов А.А., Кувшинников С.И. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха // АНРИ. 2008. № 2. С. 37–43.
20. Цапалов А.А. Оценка среднегодового уровня ЭРОА радона в помещениях на основе результатов краткосрочных измерений радиометром «АльфаАЭРО» // АНРИ. 2008. № 3. С. 49-58.
21. Цапалов А.А. Системное исследование динамики ЭРОА радона в помещениях и принципы контроля // АНРИ. 2010. № 2. С. 2-14.
22. Цапалов А.А., Ермилов А.П., Гулябнц Л.А. и др. Принцип оценки среднегодовой ЭРОА радона в зданиях по результатам краткосрочных измерений // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 23–27.
23. Цапалов А.А. Результаты долгосрочных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона // АНРИ. 2011. № 3(66). С. 52–64.
24. Цапалов А.А., Маренный А.М. Принципы радонового контроля в помещениях зданий // АНРИ. 2014. № 1(76). С. 6–14.
25. ISO/IEC Guide 98-3. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2008.

26. ISO/IEC Guide 98–1. Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2009.
27. ISO/IEC Guide 98–4. Uncertainty of measurement – Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2012.
28. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году. Информационный сборник НИИРГ. СПб., 2016. 73 с.
29. Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 85–103. DOI:10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103.
30. Маренный А.М., Киселёв С.М., Семёнов С.Ю. О проблеме обеспечения защиты населения России от природных источников ионизирующего излучения. Часть 2. Развитие подходов и практические мероприятия // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21, № 3. С. 527–539.
31. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
32. ISO 11665-8. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings. International Organization for Standardization; 2019.
33. Tsapalov A., Kovler K. Short- versus long-term tests of indoor radon for risk assessment by Monte-Carlo method towards effective measurement strategy // Indoor Air. 2022; 32:e13166. DOI:10.1111/ina.13166.
34. Cinelli G., Tollefsen T., Bossew P. et al. Digital version of the European Atlas of natural radiation // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. No. 196. P. 240–252.
35. IAEA. Design and conduct of indoor radon surveys. Int. Atomic Energy Agency; 2019 IAEA safety reports series no. 98, ISSN 1020–6450.
36. Holmgren O., Arvela H., Collignan B. et al. Radon remediation and prevention status in 23 European countries // Radiation Protection Dosimetry. 2013. Vol. 157, No. 3. P. 392–396.
37. Johnson F. Analysis of the wirthlin survey radon questions. US EPA Office of Policy, Planning and Evaluation; 1990.
38. George A. The history, development and the present status of the radon measurements programme in The United States of America // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 167, No. 1–3. P. 8–14.
39. UNSCEAR, 2006. Effects of ionizing radiation. Volume I: report to the general assembly scientific annexes A and B. (UNSCEAR 2006 Report) United Nations publication, New York (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).
40. Pinel J., Fearn T., Darby S., Miles J. Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom // Radiation Protection Dosimetry. 1995. Vol. 58, No. 2. P. 127–132.
41. Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data // Health Physics. 1998. Vol. 74, No. 3. P. 370–378.
42. Burke Q., Murphy P. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels // Radiation Measurements. 2011. Vol. 46, No. 10. P. 1168–1172.
43. Kozak K., Mazur J., Kozłowska B. et al. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon // Applied Radiation and Isotopes. 2011. Vol. 69, No. 10. P. 1459–1465.
44. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Вариации объемной активности радона в традиционных деревенских домах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60, № 1. С. 89–98.
45. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Onishchenko A. Seasonal variation of radon concentrations in russian residential high-rise buildings // Atmosphere. 2021. Vol. 12, No. 7. P. 930. DOI:10.3390/atmos12070930.
46. Marenny A., Nefedov N., Vorozhtsov A. Results of radon concentration measurements in some regions of Russia // Radiation Measurements. 1995. Vol. 25, No 1-4. P. 649–653.
47. Karpinska M., Munich Z., Kapala J. Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland // Journal of Environmental Radioactivity. 2004. Vol. 77, No. 2. P. 101–109.
48. Bochicchio F., Campos-Venuti G., Piermattei S. et al. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions // Radiation Measurements. 2005. Vol. 40, No. 2-6. P. 686–694.
49. Denman A., Crockett R., Groves-Kirkby C. et al. The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon – A case study in Northamptonshire, UK // Environment International. 2007. Vol. 33, No. 1. P. 34–44.
50. Font L. On radon surveys: Design and data interpretation // Radiation Measurements. 2009. Vol. 44, No. 9-10. P. 964–968.
51. Friedmann H. Final results of the Austrian radon Project // Health Physics. 2005. No. 89. P. 339–348.
52. Губина А.Т., Маренный А.М., Сакович В.А. и др. Обследование территорий, обслуживаемых ФМБА России, на содержание радона в помещениях // Медицина экстремальных ситуаций. 2012. № 4(42). С. 77–88.
53. Arvela H., Holmgren O., Hänninen P. Effect of soil moisture on seasonal variations in indoor radon concentration: modelling and measurements in 326 Finnish houses // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol. 168, No. 2. P. 277–290.
54. Steck D.J. Residential radon risk assessment: how well is it working in a high radon region? Proc 15th International Radon Symposium (American Association of Radon Scientists and Technologists, Fletcher, NC, US). 2005. P. 1–13.
55. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Жуковский М.В. Восстановление формы и параметров распределения объемной активности радона в жилищах России на основе данных 4-ДОЗ // АНРИ. 2015. № 3(82). С. 41–46.
56. Маренный А.М., Савкин М.Н., Шинкарев С.М. Модель для оценки коллективной дозы облучения населения России от радона // АНРИ. 1999. № 4(19). С. 4–11.
57. Antignani S., Venoso G., Ampollini M. et al. A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates // Science of The Total Environment. 2021. No. 762. P. 144150.
58. Tsapalov A., Kovler K., Shpak M. et al. Involving schoolchildren in radon surveys by means of the “RadonTest” online system // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. No. 217. P. 106215.
59. ISO 11665-4. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis. International Organization for Standardization; 2019.
60. Janik M., Tokonami S., Kranrod C. et al. Comparative analysis of radon, thoron and thoron progeny concentration measurements // Journal of Radiation Research. 2013. Vol. 54, No. 4. P. 597–610.

Поступила: 20.06.2023 г.

Цапалов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, консультант в области исследований и регулирования радона Научно-производственного предприятия «ДОЗА». **Адрес для переписки:** 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский проспект, дом 5, этаж 2, комната 49; E-mail: andrey-ants@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-5875-381X

Киселев Сергей Михайлович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией регулирующего надзора за объектами ядерного наследия отдела радиационной безопасности населения, Государственный научный центр Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-2613-2293

Ковлер Константин Леонидович – кандидат технических наук, профессор, заведующий отделом строительных материалов и технологий факультета строительства и охраны окружающей среды Израильского технологического института «Технион» (Technion – Israel Institute of Technology), Хайфа, Израиль

ORCID: 0000-0002-8227-8975

Микляев Петр Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор Российской академии наук, заместитель директора по научной работе Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

ORCID: 0000-0003-1821-6275

Петрова Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Жуковский Михаил Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, профессор кафедры экспериментальной физики Уральского федерального университета, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0002-5729-6530

Ярмошенко Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, директор Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0002-6591-1513

Маренный Альберт Михайлович – доктор физико-математических наук, академик Российской академии естественных наук, главный научный сотрудник лаборатории природных источников ионизирующих излучений, Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-6142-0234

Тутельян Ольга Евгеньевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационного контроля и физических факторов Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Кувшинников Сергей Иванович – врач по радиационной гигиене лаборатории радиационного контроля и физических факторов Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Для цитирования: Цапалов А.А., Киселев С.М., Ковлер К.Л., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Маренный А.М., Тутельян О.Е., Кувшинников С.И. Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 84-104. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-84-104

Standardization of indoor radon measurements based on rational criterion for conformity assessment

Andrey A. Tsapalov¹, Sergey M. Kiselev², Konstantin L. Kovler³, Peter S. Miklyaev⁴, Tatyana B. Petrova⁵, Michael V. Zhukovsky⁶, Ilya V. Yarmoshenko⁶, Albert M. Marennyy⁷, Olga E. Tutelyan⁸, Sergey I. Kuvshinnikov⁸

¹Scientific Production Company «Doza», Ltd, Zelenograd, Moscow, Russia

²State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

³Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

⁴Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁶Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

⁷Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

⁸Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

Significant temporal variations in radon are observed in any buildings, including unoccupied buildings with limited ventilation. This fact causes serious difficulties in radiation monitoring to assess the compliance of premises with the requirements of the normative, which limits the annual average level of radon in buildings. Therefore, neither at the national nor at the international level has yet been solved the problem of standardizing the indoor radon measurement if the test duration is less than a year. An analysis of approaches to radon measurement, including an assessment of the effectiveness of regulation, shows very significant differences between practices established in different countries. For example, in Russia, rapid (no more than 20 min) measurements are mainly used and mitigation measures to protect existing buildings from radon are practically not carried out. In European countries, mainly long-term (at least two months) measurements are used, while mitigation measures are still relatively rare, with the exception of the UK and Sweden. In the USA, short-term (2–7 days) measurements are widely used, which are not only carried out, but also paid for by residents themselves, including mitigation measures. However, despite the established approaches to indoor radon monitoring in Russia and the USA, there is a persistent distrust among specialists in the results of short-term and, especially, rapid measurements. In this regard, a compromise approach is proposed to standardize radon measurements based on a rational criterion by applying fundamental ISO/IEC concepts such as “measurement uncertainty” and “conformity assessment”. The rational criterion for conformity assessment allows using measurements of different durations, providing a given reliability when making a decision. It also proposes a rationale for optimizing indoor radon monitoring through the participation of not only professional inspectors, but also the population itself due to the possibility of introducing simple methods and inexpensive radon devices within the rational criterion.

Key words: radon, buildings, temporal variations, reference level, standardization, measurement uncertainty, conformity assessment, rational criterion, measurement duration.

Personal contribution of authors

Tsapalov A.A. – development of the concept and structure of the review article, writing the text, as well as coordinating the work on the article.

Kiselev S.M. – review of normative and methodological documents, writing the text and editing the article.

Kovler K.L. – review of foreign literature and editing of the article.

Miklyaev P.S. – writing the text and editing the article.

Petrova T.B. – review of national literature and editing of the article.

Zhukovsky M.V. – editing sections of the article.

Yarmoshenko I.V. – editing sections of the article.

Marennyy A.M. – editing the article regarding the organization of measurements.

Tutelyan O.E. – agreement to be responsible for all aspects of the article.

Kuvshinnikov S.I. – agreement to be responsible for all aspects of the article.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Financing

The scientific review had no sponsorship.

Andrey A. Tsapalov

Scientific Production Company «Doza»

Address for correspondence: Georgievsky prospect, 5, floor 2, room 49, Zelenograd, Moscow, 124498,

E-mail: andrey-ants@yandex.ru

References

1. UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly United Nations. Vol. 1. Annex B, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
2. Barkovsky AN, Akhmatdinov Ruslan R, Akhmatdinov Rustam R, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2021. Handbook. St. Petersburg; 2022. 72 p. Available from: http://niirg.ru/PDF/inf_sbor/2021.pdf (Accessed 29 May 2023). (In Russian).
3. Cincinelli A, Martellini T. Indoor air quality and health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(11): 1286.
4. WHO. Housing and Health Guidelines. Geneva: World Health Organization; 2018.
5. ANSI/AARST MAH. Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes. 2019. Available from: <https://standards.aarst.org> (Accessed 29 May 2023).
6. US EPA. Home buyer's and seller's guide to radon. EPA 402/K-12/002. United States Environmental Protection Agency; 2018. Available from: <https://www.epa.gov/radon> (Accessed: 29 May 2023).
7. Tsapalov AA, Kovler KL. Studying temporal variations of indoor radon as a vital step towards rational and harmonized international regulation. *Environmental Challenges*. 2021;4: 1002. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100204.
8. EU-BSS, Council Directive 2013/59/Euratom. Laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation and repealing directives 89/618, 90/641, 96/29, 97/43 and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union*, L13. 2014.
9. Tryggve R. Analysis of Radon Levels in Swedish Dwellings and Workplaces. Research Report. Stockholm: Swedish Radiation Safety Authority; 2021.
10. Petermann E, Bossew P, Hoffmann B. Radon hazard vs. radon risk – on the effectiveness of radon priority areas. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022;244-245: 106833.
11. ICRP. Radiological protection against radon exposure. The international commission on radiological protection. 2014. ICRP publication 126. *Annals of the ICRP*. 2014;43(3).
12. ICRP. Protection against Radon-222 at home and at work. The international commission on radiological protection. 1993. ICRP publication 65. *Annals of the ICRP*. 1993;23(2): 1-45.
13. Tsapalov AA, Kovler KL. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;183: 59–72.
14. Tsapalov AA, Kiselev SM, Marennyy AM. Uncertainty of the results of the radon control in residential buildings. Part 2. Experimental assessment of the radon temporal variations. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 64-79. (In Russian).
15. Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV, Onishchenko AD, Vasilyev A, Malinovskiy G. Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;232(1): 106575. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106575.
16. Tsapalov AA, Kovler KL. Temporal uncertainty versus coefficient of variation for rational regulation of indoor radon. *Indoor Air*. 2022;32: e13098. DOI: 10.1111/ina.13098.
17. Becker R, Haquin G, Kovler K. Air change rates and radon accumulation in rooms with various levels of window and door closure. *Journal of Building Physics*. 2013;38(3): 234–261.
18. Onishchenko AD, Zhukovsky MV, Vasilyev AV. The influence of temporal variations of radon concentration and measurement uncertainties on the assessment of the average seasonal values of radon volumetric activity indoors. *ANRI=ANRI*. 2013;3(74): 2-12. (In Russian).
19. Tsapalov AA, Kuvshinnikov SI. The dependence of the indoors volumetric activity of radon on the difference between the internal and external air temperatures. *ANRI=ANRI*. 2008;2: 37–43 (In Russian).
20. Tsapalov AA. Assessment of the annual average level of EEC radon indoors based on the results of short-term measurements with the AlphaAERO radiometer. *ANRI=ANRI*. 2008;3: 49-58. (In Russian).
21. Tsapalov AA. A system research of the dynamics of EEC radon indoors and the principles of control. *ANRI=ANRI*. 2010;2: 2-14. (In Russian).
22. Tsapalov AA, Ermilov AP, Gulabyan LA, Gubin AT, Kuvshinnikov SI. Principle of Estimation Annual Radon EEC in Building by Results of Short-Term Measurements. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(3):23-27. (In Russian).
23. Tsapalov AA. The results of long-term studies of the patterns of behavior of radon gas and its EEC in buildings in the Moscow region. *ANRI=ANRI*. 2011;3(66): 52–64. (In Russian).
24. Tsapalov AA, Marennyy AM. Principles of radon control in buildings. *ANRI=ANRI*. 2014;1(76): 6–14 (In Russian).
25. ISO/IEC Guide 98–3. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2008.
26. ISO/IEC Guide 98–1. Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2009.
27. ISO/IEC Guide 98–4. Uncertainty of measurement – Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2012.
28. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Exposure doses to the population of the Russian Federation in 2015. Information collection of NIIRG. Saint-Petersburg; 2016. 73 p. (In Russian).
29. Kononenko DV. Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 85-103. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103. (In Russian).
30. Marennyy AM, Kiselev SM, Semyonov SY. On the problem of ensuring the protection of the population of Russia from natural sources of ionizing radiation. Part 2. Development of approaches and practical measures. *Medicina Extremalnih Situatsii = Extreme Medicine*. 2019;21(3): 527-539. (In Russian).
31. Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon. From fundamental research to regulatory practice. Moscow: Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical; 2016. 432 p. (In Russian).
32. ISO 11665-8. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings. International Organization for Standardization; 2019.
33. Tsapalov AA, Kovler KL. Short- versus long-term tests of indoor radon for risk assessment by Monte-Carlo method towards effective measurement strategy. *Indoor Air*. 2022;32: e13166. DOI: 10.1111/ina.13166.
34. Cinelli G, Tollefsen T, Bossew P, Gruber V, Bogucarskis K, Felice LD, et al. Digital version of the European Atlas of natural radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;196: 240–252.
35. Design and conduct of indoor radon surveys. IAEA safety reports series no. 98. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2019.
36. Holmgren O, Arvela H, Collignan B, Jiránek M, Ringer W. Radon remediation and prevention status in 23 European countries. *Radiation Protection Dosimetry*. 2013;157(3): 392–396.
37. Johnson F. Analysis of the wirthlin survey radon questions. US EPA Office of Policy, Planning and Evaluation; 1990.

38. George A. The history, development and the present status of the radon measurements programme in The United States of America. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;167(1–3): 8–14.
39. UNSCEAR, 2006. Effects of ionizing radiation. Vol. 1: Report to the general assembly scientific annexes A and B. (UNSCEAR 2006 Report) United Nations publication, New York (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).
40. Pinel J, Fearn T, Darby S, Miles J. Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom. *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;58(2): 127–132.
41. Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data. *Health Physics*. 1998;74(3): 370–378.
42. Burke Q, Murphy P. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels. *Radiation Measurements*. 2011;46(10): 1168–1172.
43. Kozak K, Mazur J, Kozłowska B, Karpińska M, Przylibski TA, Mamont-Cieśła K, et al. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. *Applied Radiation and Isotopes*. 2011;69(10): 1459–1465.
44. Miklyaev PS, Petrova TB. Variations of radon concentration in traditional russian rural wooden houses. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2020;60(1): 89–98. (In Russian).
45. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Onishchenko AD. Seasonal variation of radon concentrations in Russian residential high-rise buildings. *Atmosphere*. 2021;12(7): 930. DOI: 10.3390/atmos12070930.
46. Marennyy AM, Nefedov NA, Vorozhtsov AV. Results of radon concentration measurements in some regions of Russia. *Radiation Measurements*. 1995;25(1–4): 649–653.
47. Karpinska M, Munich Z, Kapala J. Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;77(2): 101–109.
48. Bochicchio F, Campos-Venuti G, Piermattei S, Nuccetelli C, Risica S, Tommasino L, et al. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions. *Radiation Measurements*. 2005;40(2–6): 686–694.
49. Denman A, Crockett R, Groves-Kirkby C, Phillips PS, Gillmore GK, Woolridge AC. The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon – A case study in Northamptonshire, UK. *Environment International*. 2007;33(1): 34–44.
50. Font L. On radon surveys: Design and data interpretation. *Radiation Measurements*. 2009;44(9–10): 964–968.
51. Friedmann H. Final results of the Austrian radon Project. *Health Physics*. 2005;89: 339–348.
52. Gubin AT, Marennyy AM, Sakovich VA, Astafurov VI, Nefedov NA, Penezhev AV. Examination of the territories served by the FMBA of Russia for the content of indoor radon. *Meditsina Ekstremal'nykh Situatsiy = Extreme Medicine*. 2012;4(42): 77–88. (In Russian).
53. Arvela H, Holmgren O, Hänninen P. Effect of soil moisture on seasonal variations in indoor radon concentration: modelling and measurements in 326 Finnish houses. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;168(2): 277–290.
54. Steck DJ. Residential radon risk assessment: how well is it working in a high radon region? Proc 15th International Radon Symposium (American Association of Radon Scientists and Technologists, Fletcher, NC, US), 2005. P. 1–13.
55. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Zhukovsky MV. Reconstruction of the forms and parameters of the distribution of radon concentration in Russian dwellings based on 4-DOZ data. *ANRI=ANRI*. 2015;3(82): 41–46 (In Russian).
56. Marennyy AM, Savkin MN, Shinkarev SM. A model for estimating the collective exposure dose from radon for the population of Russia. *ANRI=ANRI*. 1999;4(19): 4–11 (In Russian).
57. Antignani S, Venoso G, Ampollini M, Caprio M, Carpentieri C, Di Carlo Ch, et al. A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates. *Science of the Total Environment*. 2021;762: 144150.
58. Tsapalov AA, Kovler KL, Shpak MN, Shafir E, Golumbic Y, Peri A, et al. Involving schoolchildren in radon surveys by means of the “RadonTest” online system. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;217: 106215.
59. ISO 11665-4. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis. International Organization for Standardization; 2019.
60. Janik M, Tokonami S, Kranrod C, Sorimachi A, Ishikawa T, Hosoda M, et al. Comparative analysis of radon, thoron and thoron progeny concentration measurements. *Journal of Radiation Research*. 2013;54(4): 597–610.

Received: June 20, 2023

For correspondence: Andrey A. Tsapalov – Doctor of Technical Sciences, Experienced Researcher, Consultant in the field of radon research and regulation, Scientific Production Company “Doza”, Ltd (Georgievsky prospect, 5, floor 2, room 49, Zelenograd, Moscow, 124498; E-mail: andrey-ants@yandex.ru)

ORCID: 0000-0002-5875-381X

Sergey M. Kiselev – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Regulatory Supervision of Nuclear Heritage Objects, Department of Radiation Safety of the Population, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-2613-2293

Konstantin L. Kovler – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Building Materials, Performance and Technology” of the National Building Research Institute, Department of Structural Engineering and Construction Management, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

ORCID: 0000-0002-8227-8975

Peter S. Miklyaev – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0003-1821-6275

Tatyana B. Petrova – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Michael V. Zhukovsky – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Experimental Physics of the Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5729-6530

Ilya V. Yarmoshenko – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0002-6591-1513

Albert M. Marennyy – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Natural Sources of Ionizing Radiation, Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-6142-0234

Olga E. Tutelyan – Doctor of Medical Sciences, Head of the Laboratory of Radiation Control and Physical Factors of the Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

Sergey I. Kuvshinnikov – Radiation Hygiene Doctor, Laboratory of Radiation Control and Physical Factors, Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

For citation: Tsapalov A.A., Kiselev S.M., Kovler K.L., Miklyaev P.S., Petrova T.B., Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Marennyy A.M., Tutelyan O.E., Kuvshinnikov S.I. Standardization of indoor radon measurements based on rational criterion for conformity assessment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 84-104. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-84-104

Медицинское облучение пациентов за счет рентгенорадиологических диагностических процедур, проведенных в 2022 г. в медицинских организациях Российской Федерации

А.А. Братилова, А.Н. Барковский

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 анализа информации о дозах медицинского облучения населения Российской Федерации в 2022 г., поступившей в виде форм федерального статистического наблюдения № 3-ДОО «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгено-радиологических исследований»¹ в Федеральный банк данных по дозам медицинского облучения², функционирующий на базе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, а также полученной в рамках радиационно-гигиенической паспортизации от Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации, Министерства обороны Российской Федерации и Федеральной службы исполнения наказаний Российской Федерации. Представлены данные по структуре доз медицинского облучения населения субъектов Российской Федерации и России в целом в 2022 г., а также по динамике этих показателей за последние 5 лет. Средняя доза медицинского облучения населения Российской Федерации в 2022 г. составила 0,86 мЗв/год в расчете на 1 жителя и 0,43 мЗв в расчете на 1 процедуру. Наибольшее значение средней дозы на жителя в 2022 г. были в Москве (1,71 мЗв), Республике Карелия (1,5 мЗв), Ненецком автономном округе (1,32 мЗв), Хабаровском крае (1,26 мЗв), Мурманской (1,23 мЗв) и Магаданской (1,20 мЗв) областях. Еще в 15 субъектах Российской Федерации годовые эффективные дозы медицинского облучения в среднем на 1 жителя в 2022 г. превысили 1 мЗв. Наибольшее значение средней дозы на процедуру в 2022 г. были в Республике Адыгея (0,96 мЗв), Москве (0,74 мЗв) и Республике Ингушетия (0,73 мЗв), а по видам исследований: при флюорографии в Республиках Северная Осетия (0,18 мЗв), Крым (0,18 мЗв) и Адыгея (0,15 мЗв) при среднем значении по Российской Федерации 0,05 мЗв; при рентгенографии в Калининградской (0,11 мЗв) и в Тверской (0,11 мЗв) областях при среднем значении по Российской Федерации 0,06 мЗв; при рентгеноскопии в г. Севастополе (7,59 мЗв), в Удмуртской Республике (5,97 мЗв) и в Республике Крым (5,75 мЗв) при среднем значении по Российской Федерации 2,35 мЗв; при компьютерной томографии в Ненецком автономном округе (6,25 мЗв), в Республиках Карелия (5,92 мЗв) и Адыгея (5,43 мЗв) при среднем значении по Российской Федерации 3,86 мЗв; при специальных исследованиях в Омской области (16,5 мЗв), Республике Карелия (16,4 мЗв) и Владимирской области (13,7 мЗв) при среднем значении по Российской Федерации 4,89 мЗв; при радионуклидной диагностике во Владимирской (30,1 мЗв), Ивановской (23,2 мЗв) и Ростовской (19,5 мЗв) областях при среднем значении по Российской Федерации 8,07 мЗв; при прочих рентгенорадиологических процедурах в Республике Башкортостан (8,53 мЗв), Нижегородской (7,90 мЗв) и Вологодской (7,40 мЗв) областях при среднем значении по Российской Федерации 1,04 мЗв. Максимальная средняя по субъектам Российской Федерации доза медицинского облучения в расчете на процедуру превышает среднее по Российской Федерации значение в 2,2 раза, а в расчете на жителя — в 2 раза, что можно считать вполне удовлетворительным результатом с учетом существенной разницы в структуре их рентгенодиагностики.

¹ Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 31 июля 2000 г. № 298 «Об утверждении Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation of July 31, 2000, No. 298 «On Approval of the Regulations on the Unified State System of Control and Registration of Individual Doses of Citizens» (In Russ.)]

² Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 01.11.2002 г. № 333 «О создании федерального банка данных единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 333 of 01.11.2002 «On Creation of the Federal Data Bank of the Unified State System of Control and Registration of Individual Doses of Citizens» (In Russ.)]

Братилова Анжелика Анатольевна

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

Ключевые слова: единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз граждан, ЕСКИД, форма № 3-ДОЗ, дозы медицинского облучения пациентов, средняя годовая эффективная доза медицинского облучения, коллективная доза медицинского облучения.

Введение

По данным радиационно-гигиенической паспортизации [1–5], вклад медицинского облучения в годовую коллективную эффективную дозу облучения жителей Российской Федерации (далее – РФ) от всех источников ионизирующего излучения (далее – ИИИ) является вторым по значимости после природного облучения. В 2022 г. он составил 22,2% [5], причем, в отличие от хронического природного облучения, воздействующего на все население, медицинское облучение является острым, т.е. реализуется за очень короткие промежутки времени и воздействует не на все население, а только на пациентов, прошедших в отчетном году процедуры медицинских рентгенорадиологических диагностических исследований. Это делает радиационное воздействие медицинского облучения на население РФ еще более значимым и требует серьезных усилий для недопущения его необоснованного роста.

Контроль доз медицинского облучения в РФ осуществляется в рамках единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения (ЕСКИД), созданной в соответствии с требованиями статьи 18 Федерального закона «О радиационной безопасности населения»³ и функционирующей с 2000 г. Каждое медицинское учреждение, проводящее рентгенорадиологические диагностические исследования пациентов, ежегодно заполняет и представляет в региональный банк данных медицинского облучения пациентов (далее – РБДМ) форму федерального статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований» (далее – форма № 3-ДОЗ). Из РБДМ данные форм № 3-ДОЗ передаются в Федеральный банк данных по дозам медицинского облучения (далее – ФБДМ), функционирующий на базе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева (далее – НИИРГ им. П.В. Рамзаева). Специалистами НИИРГ им. П.В. Рамзаева проводится предварительная оценка поступающей информации, ее анализ и обобщение с целью формирования формы № 3-ДОЗ РФ. В обобщенном виде данная информация включается в ежегодно издаваемый справочник «Радиационная обстановка на территории Российской Федерации».

В 2022 г. 85 субъектов Российской Федерации (далее – СРФ) представили в ФБДМ сведения о дозах облучения пациентов в медицинских учреждениях, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор. Не представили данные за 2022 г. только Донецкая и Луганская Народные Республики и Запорожская и Херсонская области.

В Республиках Ингушетия, Калмыкия, Северная Осетия – Алания и Чукотском автономном округе все дан-

ные по дозам медицинского облучения пациентов в 2022 г. были получены расчетным методом, в 60 СРФ – частично расчетным методом, а частично инструментальными методами, и только в 21 СРФ все дозы медицинского облучения пациентов в 2022 г. были получены инструментальными методами. Т.е. только в 21 СРФ в 2022 г. полностью выполнялись требования статьи 18 федерального закона «О радиационной безопасности населения», а в 4 СРФ – они полностью игнорировались. Это, конечно, снижает достоверность получаемых данных и требует серьезных усилий по решению данной проблемы.

Цель исследования – проведение анализа содержащейся в ФБДМ информации по дозам медицинского облучения пациентов за счет различных видов рентгено-радиологических диагностических исследований пациентов, проведенных в Российской Федерации в 2022 г. и динамики их изменения за последние 5 лет.

Материалы и методы

Для проведения анализа использовалась информация, поступившая в ФБДМ и полученная в рамках радиационно-гигиенической паспортизации. Анализировались данные ФБДМ и данные по дозам медицинского облучения пациентов, представленные Федеральным медико-биологическим агентством России (ФМБА), Министерством внутренних дел (МВД) России и Федеральной службой исполнения наказаний (ФСИН) России в виде приложений к радиационно-гигиеническому паспорту РФ за 2022 г. [5].

Результаты и обсуждение

Данные, поступающие в ФБДМ от субъектов РФ, включают информацию о дозах медицинского облучения пациентов, полученных расчетным либо инструментальным методом. С каждым годом происходит постоянный рост числа медицинских организаций, которые используют при заполнении № 3-ДОЗ только результаты инструментальных измерений [6–10].

На рисунке 1 представлена динамика процентного вклада рентгенодиагностических процедур [6–10], дозы пациентов при которых определялись с использованием инструментальных методов, в общее число проведенных в РФ в 2022 г. рентгенодиагностических процедур. Видна положительная динамика данного показателя. В 2022 г. вклад измеренных доз медицинского облучения пациентов в среднем по РФ достиг 82%. Но 18% доз пациентов все еще получают расчетными методами с использованием среднероссийских значений, т.е. никак не связаны с реальными дозами конкретных пациентов.

Динамика количества проведенных в РФ всех видов рентгенорадиологических диагностических процедур и компьютерных томографий приведена на рисунке 2.

³ Собрание законодательства Российской Федерации, 1996, № 3, ст. 141; 2004, № 35, ст. 3607; 2008, № 30 (ч. 2), ст. 3616. [Collection of Legislation of the Russian Federation, 1996, No. 3, Art. 141; 2004, No. 35, Art. 3607; 2008, No. 30 (part 2), Art. 3616. (In Russ.)]



Рис. 1. Процентный вклад процедур, дозы для которых получены инструментальными методами, в общее количество проведенных рентгенодиагностических процедур
[Fig. 1. Percentage contribution of procedures with the dose values estimated with measurements to the total number of X-ray diagnostic procedures performed]

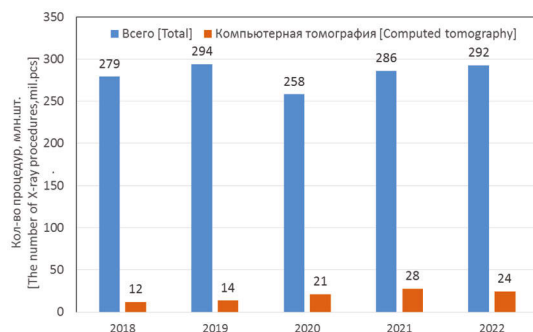


Рис. 2. Изменение количества рентгенорадиологических процедур, проведенных в РФ в 2018–2022 гг.
[Fig. 2. Amount of X-ray examinations, for which the data are submitted in the Federal Data Base of medical exposure doses in the period from 2018 to 2022]

На рисунке 3 представлена динамика годовой коллективной дозы медицинского облучения за счет всех проведенных рентгенорадиологических диагностических процедур и за счет компьютерных томографий за последние 5 лет.

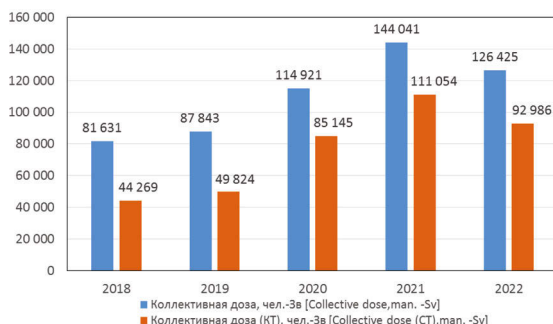


Рис. 3. Изменение коллективных доз медицинского облучения пациентов в 2018–2022 гг.

[Fig. 3. Collective dose of medical exposure due to X-ray procedures for which the data are submitted in the Federal Data Base of medical exposure doses in the period from 2018 to 2022]

Как видно из представленных результатов, общее количество проведенных рентгенодиагностических процедур изменяется незначительно без явной тенденции

к росту или уменьшению, а для количества проведенных компьютерных томографий наблюдается явная тенденция к росту [11]. Постоянно возрастает и годовая коллективная доза медицинского облучения, в основном, из-за увеличения вклада дозы за счет компьютерных томографий. Некоторый спад отмечается в 2022 г., но он связан с аномальным ростом количества компьютерных томографий в 2021 г. в связи с эпидемией COVID-19 и не выпадает из общей тенденции [12].

В 2022 г. структура лучевой диагностики и коллективной дозы населения Российской Федерации при медицинском облучении заметно изменилась после завершения эпидемии новой коронавирусной инфекции COVID-19. По сравнению с 2021 г. ситуация нормализуется. Наблюдается рост числа всех диагностических рентгено-радиологических процедур в России с 286 млн в 2021 г. до 292,4 млн в 2022 г. Коллективная доза медицинского облучения населения Российской Федерации в 2022 г. несколько уменьшилась и составила 126,4 тыс. чел.-Зв.

Более детальные сведения об изменении структуры количества проведенных рентгенорадиологических диагностических процедур и коллективной дозы медицинского облучения за период 2021–2022 гг. по видам диагностических исследований представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Как следует из таблицы 1, количество всех рентгено-радиологических процедур в 2022 г. увеличилось на 2% по сравнению с 2021 г. Рост был зафиксирован для большинства видов лучевой диагностики: 1% для флюорографических исследований, 5% для рентгенографических исследований, 5% для рентгеноскопических исследований, 9% для интервенционных исследований, 6% для радионуклидных исследований и 3% для прочих исследований. Значительное снижение числа общего числа компьютерно-томографических исследований связано с сокращением исследований органов грудной клетки, выполнявшихся пациентам с новой коронавирусной инфекцией COVID-19. В 2022 г. компьютерных томографий органов грудной клетки было выполнено на 40% меньше, чем в 2021 г., что привело к сокращению на 13% полного количества проведенных компьютерных томографий. Обращает на себя внимание рост числа современных высокодозовых интервенционных и радионуклидных исследований.

Рост числа рентгенорадиологических процедур обусловлен, в первую очередь, восстановлением в 2022 г. объемов плановой медицинской помощи населению, в том числе и процедур лучевой диагностики, и возвратом медицинских организаций к нормальному режиму работы. Тем не менее, число выполненных в 2022 г. процедур, за исключением компьютерной томографии и радионуклидных исследований, все еще ниже аналогичных показателей 2019 г.

Как следует из таблицы 2, коллективная доза медицинского облучения в 2022 г. снизилась на 12% по сравнению с 2021 г. Основной вклад в снижение коллективной дозы внесла компьютерная томография (-16%) в сочетании с незначительным снижением на 1–6% коллективной дозы от традиционных видов лучевой диагностики (рентгенографии, флюорографии и рентгеноскопии). Напротив, отмечено увеличение коллективной дозы от интервенционных исследований по сравнению с 2021 г. на 11%.

Таблица 1

Изменение количества рентгенорадиологических процедур, проведенных в РФ в период 2021–2022 гг.

[Table 1]

Changes in the number of radiology procedures performed in the Russian Federation in the period 2021–2022

Вид диагностических исследований [Type of examination]	Количество рентгенорадиологических процедур, тыс. [Number of X-ray procedures, thousands]		% изменения 2021/2022 [% of change, 2021/2022]
	2021	2022	
Флюорография [Fluorography]	77 723	78 526	+1
Рентгенография [Radiography]	176 965	185 683	+5
Рентгеноскопия [Fluoroscopy]	1 086	1 137	+5
Компьютерная томография [Computed tomography]	27 617	24 082	-13
Интервенционные исследования [Interventional examinations]	1629	1 781	+9
Радионуклидная диагностика [Diagnostic nuclear medicine]	715	755	+6
Прочие [Other]	415	426	+3
Всего [Total]	286 150	292 388	+2

Таблица 2

Изменение коллективной дозы медицинского облучения в период 2021–2022 гг.

[Table 2]

Changes in the collective dose from medical exposure in the period of 2021–2022

Вид диагностических исследований [Type of examination]	Коллективная доза, чел.-Зв [Collective dose, man.-Sv]		% изменения 2021/2022 [% of change, 2021/2022]
	2021	2022	
Флюорография [Fluorography]	4 264	4 231	-1
Рентгенография [Radiography]	11 958	11 283	-6
Рентгеноскопия [Fluoroscopy]	2 860	2 676	-6
Компьютерная томография [Computed tomography]	111 054	92 986	-16
Радионуклидная диагностика [Diagnostic nuclear medicine]	6 063	6 094	+0,5
Интервенционные исследования [Interventional examinations]	7 843	8 712	+11
Прочие [Other]	485	444	-8
Всего [Total]	144 041	126 425	-12

В таблице 3 представлена динамика средних доз медицинского облучения населения РФ в расчете на 1 жителя и в расчете на 1 процедуру.

Из таблицы 3 видно, что в 2022 г. произошло снижение средних доз медицинского облучения как на 1 жителя, так и на 1 процедуру, после многолетнего роста данных величин, что также связано со снижением в 2022 г. вклада компьютерной томографии.

В таблице 4 приведены количество процедур, коллективные дозы облучения по видам исследований и их про-

центный вклад в полную дозу медицинского облучения населения РФ за 2022 г.

Из таблицы 4 видно, что рентгенография в 2022 г. являлась основным по количеству проведенных процедур (63,5%) видом исследования и внесла второй по величине вклад (8,92%) в коллективную дозу. Флюорография в 2022 г. являлась вторым по количеству проведенных процедур (26,9%) видом исследования и внесла пятый по величине вклад (3,35%) в коллективную дозу. На первом месте по величине вклада в коллективную дозу уже кото-

Таблица 3

Динамика средних по РФ доз медицинского облучения населения в расчете на 1 жителя и в расчете на 1 процедуру

[Table 3]

Dynamics of average doses from medical exposure of the public of the Russian Federation per one inhabitant and per one procedure]

Средняя по РФ эффективная доза [Mean effective dose in the Russian Federation]		
Год [year]	На 1 жителя, мЗв/год [Per an inhabitant, mSv/year]	На 1 процедуру, мЗв [Per a procedure, mSv/year]
2018	0,57	0,29
2019	0,61	0,31
2020	0,81	0,44
2021	0,99	0,50
2022	0,86	0,43

Таблица 4

Количество процедур, коллективные дозы облучения по видам исследований и их процентный вклад в полную дозу медицинского облучения населения РФ за 2022 г.

[Table 4]

Number of X-ray procedures, corresponding collective doses and their contribution to the total dose from medical exposure of the public of the Russian Federation in 2022]

Вид Type	Процедуры [Procedures]		Коллективные дозы [Collective doses]	
	тыс. шт. [thousands]	%	чел.-Зв/год [man.-Sv/year]	%
Флюорографические [Fluorography]	78 526	26,9	4 231	3,35
Рентгенографические [Radiography]	185 683	63,5	11 283	8,92
Рентгеноскопические [Fluoroscopy]	1 137	0,39	2 676	2,12
Компьютерная томография [Computed tomography]	24 082	8,24	92 986	73,6
Радионуклидные исследования [Diagnostic nuclear medicine]	755	0,26	6 094	4,82
Прочие [Other]	2 207	0,75	9 155	7,24
ВСЕГО [Total]	292 388	100,0	126 425	100,0

рый год находится компьютерная томография (73,6%). Однако в 2022 г. произошло некоторое снижение количества компьютерно-томографических исследований. В 2021 г. численность данного вида процедур составила 9,65% от общего числа рентгенорадиологических исследований, а в 2022 г. – 8,24%. И соответственно, уменьшился вклад в коллективную дозу компьютерной томографии в 2022 г. по сравнению с 2021 г.

В 2022 г. максимальные значения количества компьютерно-томографических исследований и коллективной дозы за счет проведенных компьютерных томографий были зафиксированы в Москве (3517 тыс. процедур и 16 260 чел.-Зв), в Московской области (1289 тыс. процедур и 4720 чел.-Зв), в Краснодарском крае (1186 тыс. процедур и 5277 чел.-Зв), в Санкт-Петербурге (1168 тыс.

процедур и 4573 чел.-Зв) и в Республике Башкортостан (8922 тыс. процедур и 3019 чел.-Зв).

На рисунке 4 представлено изменение количества проведенных в РФ рентгенорадиологических диагностических процедур за период 2018–2022 гг., а на рисунке 5 – динамика средних по РФ доз пациентов за 1 процедуру для различных видов рентгенологических исследований.

Как видно из представленных результатов, наблюдаются выраженный рост количества проведенных компьютерных томографий (за исключением 2022 г.) и снижение количества рентгеноскопий. Количество проведенных флюорографий, рентгенографий, радионуклидных исследований и прочих изменялось незначительно без выраженной тенденции.

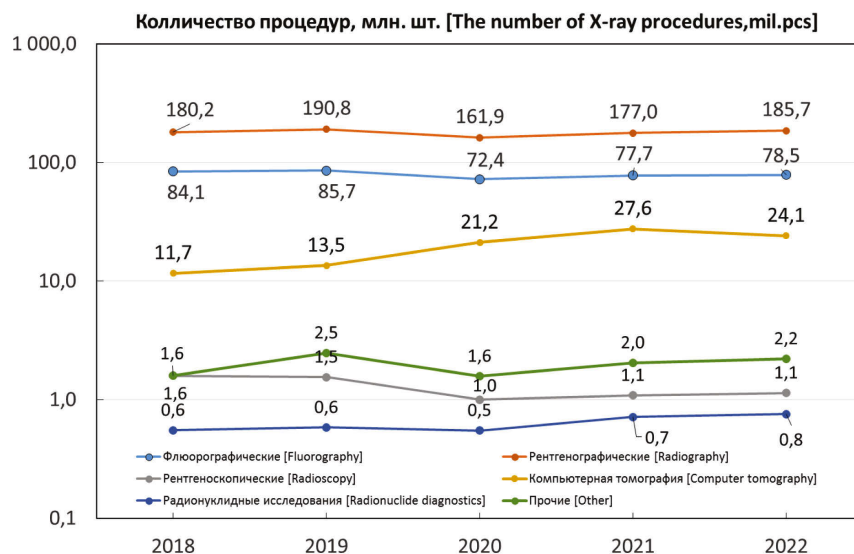


Рис. 4. Динамика количества рентгенологических исследований в Российской Федерации за 2018–2022 гг.
[Fig. 4. Dynamics of the number of X-ray examinations in the Russian Federation in 2018–2022]

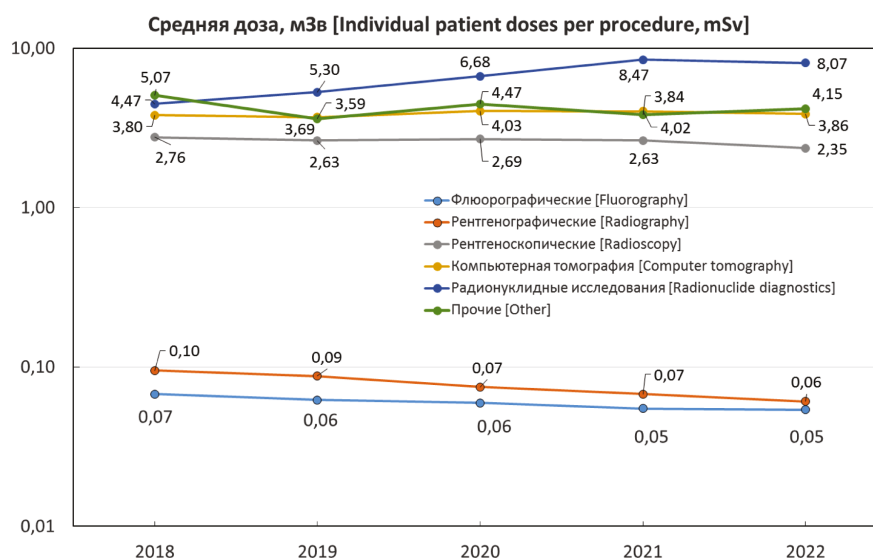


Рис. 5. Динамика средних индивидуальных доз пациентов за 1 процедуру для различных видов рентгенологических процедур в Российской Федерации

[Fig. 5. Dynamics of mean individual patient doses per procedure for different types of X-ray procedures in the Russian Federation]

В таблице 5 представлено сопоставление средних по РФ доз облучения пациентов при проведении различных рентгенорадиологических диагностических процедур, оцененных по результатам инструментальных измерений (измеренные дозы) или посредством приписывания табулированных значений доз (расчетные дозы), рекомендованных в методических рекомендациях по заполнению формы № 3-ДОЗ⁴.

Как видно из представленных данных, имеет место занижение средних значений рассчитанных доз на 1 рентгенодиагностическую процедуру для цифровой рентгенографии и рентгеноскопии. Для остальных видов исследований средние значения доз, полученных расчетным методом, несколько выше измеренных.

Данные о средних по РФ дозах медицинского облучения населения в расчете на 1 жителя и в расчете

⁴ Методические рекомендации № 2.6.1. ... -14 «Заполнение формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ». Онлайн-ресурс. Доступно по адресу: http://www.niirg.ru/PDF/MR_3-DOS_2013.pdf. Дата последнего доступа 13.11.2023г. [Methodological Recommendations No. 2.6.1. ... -14 "Completion of the Federal State Statistical Surveillance Form No. 3-DOZ". Online resource. Available at: http://www.niirg.ru/PDF/MR_3-DOS_2013.pdf. Last accessed on 13.11.2023. (In Russ.)]

Таблица 5

Сравнение средних индивидуальных доз у пациентов за процедуру, оцененных расчетным методом и по результатам измерений, для разных рентгенологических процедур, мЗв

[Table 5]

Comparison of average individual patient doses per procedure, estimated by calculation method and by measurements, for different X-ray procedures, mSv

Средняя индивидуальная доза за процедуру [Mean individual dose per procedure, mSv]	Рентгенологические процедуры [X-ray procedures]								
	ФГ [FG]		РГ [RG]		РС [FL]	КТ [CT]	СИ [IR]	ПР [Other]	В среднем [Average]
	плёночная [analogue]	цифровая [digital]	плёночная [analogue]	цифровая [digital]					
Расчетная [Calculated]	0,40	0,05	0,13	0,03	2,1	4,1	5,4	0,91	0,32
Измеренная [Measured]	0,30	0,05	0,12	0,04	2,3	3,8	4,9	0,87	0,43

ФГ – флюорограммы; РГ – рентгенограммы; РС – ренгеноскопии; КТ – компьютерная томография; РИ – радионуклидные исследования; СИ – специальные исследования; ПП – прочие исследования
[FG – fluorography; RG- radiography; FL – Fluoroscopy; CT – computed tomography; IR – interventional examinations; Other – other examinations].

на 1 процедуру за счет медицинских диагностических рентгенорадиологических исследований, проведенных в медицинских учреждениях в 2022 г., представлены

в таблицах 6–7. Они получены на основе обобщения сведений, представленных в формах № 3-ДОЗ субъектов Российской Федерации за 2022 г.

Таблица 6

Средние по СРФ дозы медицинского облучения в расчете на 1 жителя за счет медицинских диагностических рентгенорадиологических исследований, проведенных в 2022 г. в медицинских учреждениях, надзор за которыми осуществляют Роспотребнадзор, ФМБА, МВМ и ФСИН, мЗв

[Table 6]

Mean data for the regions of the Russian Federation on the doses from medical exposure per inhabitant from medical X-ray examinations performed in 2022 in medical facilities supervised by Rosbotrebnadzor, FBMA, MVM and FSIN, mSv

Код [Code]	Субъект РФ [Region of RF]	Всего	ФГ	РГ	РС	КТ	СИ	РН	Прочие [Other]
		[Total]	[FG]	[RG]	[FL]	[CT]	[IR]	[NM]	
мЗв на жителя [mSv per inhabitant]									
01	Республика Адыгея [Republic of Adygeya]	1,18	0,05	0,05	–	0,98	0,10	–	–
02	Республика Башкортостан [Republic of Bashkortostan]	1,01	0,06	0,07	0,02	0,74	0,02	0,10	0,01
03	Республика Бурятия [Republic of Buryatia]	0,51	0,03	0,05	0,01	0,36	0,04	0,02	–
04	Республика Алтай [Republic of Altai]	0,70	0,02	0,04	–	0,63	–	–	–
05	Республика Дагестан [Republic of Daghestan]	0,35	0,03	0,03	–	0,25	0,04	–	–
06	Республика Ингушетия [Republic of Ingushetia]	0,50	0,01	0,02	–	0,48	–	–	–
07	Кабардино-Балкарская Республика [Kabardino-Balkarian Republic]	0,48	0,01	0,05	–	0,39	0,02	–	–
08	Республика Калмыкия [Republic of Kalmykia]	0,99	0,02	0,03	–	0,91	0,03	–	–
09	Карачаево-Черкесская Республика [Karachayevo-Chircassian Republic]	0,71	0,02	0,04	–	0,66	–	–	–
10	Республика Карелия [Republic of Karelia]	1,50	0,01	0,08	0,05	1,15	0,20	–	–
11	Республика Коми [Komi Republic]	1,03	0,03	0,10	0,03	0,85	0,02	–	0,01

Код [Code]	Субъект РФ [Region of RF]	Всего [Total]	ФГ [FG]	РГ [RG]	РС [FL]	КТ [CT]	СИ [IR]	РН [NM]	Прочие [Other]
мЗв на жителя [mSv per inhabitant]									
12	Республика Марий Эл [Republic of Mari El]	0,45	0,03	0,08	0,01	0,32	–	–	–
13	Республика Мордовия [Republic of Mordovia]	1,07	0,03	0,07	0,01	0,93	0,03	0,01	–
14	Республика Саха (Якутия) [Republic of Sakha (Yakutia)]	1,09	0,03	0,06	0,01	0,86	0,12	–	–
15	Республика Северная Осетия – Алания [Republic of North Ossetia – Alania]	0,84	0,05	0,07	0,04	0,66	0,02	–	–
16	Республика Татарстан [Republic of Tatarstan]	0,67	0,02	0,06	0,01	0,52	0,05	0,01	–
17	Республика Тыва [Republic of Tuva]	0,60	0,08	0,05	–	0,47	–	–	–
18	Удмуртская Республика [Udmurtian Republic]	0,89	0,03	0,11	0,02	0,64	0,09	–	–
19	Республика Хакасия [Republic of Khakassia]	0,71	0,03	0,07	0,01	0,59	–	–	–
20	Чеченская Республика [Chechen Republic]	0,11	0,02	0,02	–	0,07	–	–	–
21	Чувашская Республика – Чувашия [Chuvash Republic]	0,69	0,02	0,07	–	0,56	0,02	0,01	–
22	Алтайский край [Altai Territory]	0,70	0,04	0,12	0,02	0,46	0,06	0,01	–
23	Краснодарский край [Krasnodar Territory]	1,17	0,03	0,07	0,01	0,91	0,11	0,03	–
24	Красноярский край [Krasnoyarsk Territory]	0,86	0,04	0,11	0,09	0,46	0,15	0,01	–
25	Приморский край [Primorye Territory]	0,53	0,02	0,06	–	0,44	0,01	–	–
26	Ставропольский край [Stavropol Territory]	0,62	0,04	0,08	0,02	0,40	0,04	0,05	–
27	Хабаровский край [Khabarovsk Territory]	1,26	0,03	0,07	0,03	1,00	0,04	0,06	0,02
28	Амурская область [Amur Region]	0,84	0,02	0,10	0,02	0,64	0,05	0,01	–
29	Архангельская область [Arkhangelsk Region]	0,86	0,03	0,10	0,03	0,53	0,14	0,02	0,02
30	Астраханская область [Astrakhan Region]	0,76	0,02	0,09	0,02	0,57	–	0,07	–
31	Белгородская область [Belgorod Region]	1,02	0,02	0,08	0,01	0,81	0,09	0,01	–
32	Брянская область [Bryansk Region]	0,76	0,03	0,07	–	0,65	–	0,01	–
33	Владимирская область [Vladimir Region]	0,75	0,01	0,06	0,01	0,34	0,14	0,18	–
34	Волгоградская область [Volgograd Region]	0,79	0,05	0,09	0,02	0,58	0,04	0,01	–
35	Вологодская область [Vologda Region]	0,53	0,03	0,09	–	0,38	0,03	–	–
36	Воронежская область [Voronezh Region]	0,35	0,01	0,04	0,01	0,26	0,02	0,02	–
37	Ивановская область [Ivanovo Region]	0,63	0,03	0,09	0,04	0,29	0,06	0,12	–

Код [Code]	Субъект РФ [Region of RF]	Всего [Total]	ФГ [FG]	РГ [RG]	РС [FL]	КТ [CT]	СИ [IR]	РН [NM]	Прочие [Other]
		мЗв на жителя [mSv per inhabitant]							
38	Иркутская область [Irkutsk Region]	1,11	0,05	0,12	0,05	0,85	0,03	–	–
39	Калининградская область [Kaliningrad Region]	0,89	0,04	0,14	0,01	0,46	0,23	0,01	–
40	Калужская область [Kaluga Region]	0,99	0,02	0,11	0,02	0,63	0,07	0,14	0,01
41	Камчатский край [Kamchatka Territory]	0,52	0,03	0,06	0,03	0,36	0,02	0,02	–
42	Кемеровская область [Kemerovo Region]	0,60	0,02	0,10	0,03	0,40	0,04	0,01	–
43	Кировская область [Kirov Region]	0,86	0,07	0,11	0,02	0,58	0,02	0,07	–
44	Костромская область [Kostroma Region]	0,60	0,01	0,09	–	0,49	–	–	–
45	Курганская область [Kurgan Region]	0,44	0,01	0,09	0,01	0,30	0,02	0,01	–
46	Курская область [Kursk Region]	0,94	0,02	0,06	0,03	0,65	0,05	0,13	–
47	Ленинградская область [Leningrad Region]	0,59	0,02	0,03	–	0,52	0,02	–	–
48	Липецкая область [Lipetsk Region]	1,07	0,03	0,09	0,01	0,80	0,03	0,11	–
49	Магаданская область [Magadan Region]	1,20	0,02	0,10	0,08	0,97	0,03	–	–
50	Московская область [Moscow Region]	0,73	0,01	0,07	0,01	0,56	0,04	0,03	0,02
51	Мурманская область [Murmansk Region]	1,23	0,04	0,12	0,02	0,99	0,05	0,01	–
52	Нижегородская область [Nizhny Novgorod Region]	0,59	0,03	0,08	–	0,45	0,01	–	–
53	Новгородская область [Novgorod Region]	0,57	0,03	0,09	0,01	0,33	0,10	0,01	–
54	Новосибирская область [Novosibirsk Region]	0,43	0,04	0,08	0,01	0,27	0,03	0,01	–
55	Омская область [Omsk Region]	1,05	0,05	0,13	0,01	0,52	0,33	–	–
56	Оренбургская область [Orenburg Region]	0,51	0,04	0,07	–	0,39	0,01	0,01	–
57	Орловская область [Orel Region]	0,64	0,03	0,10	0,01	0,45	0,05	–	–
58	Пензенская область [Penza Region]	0,79	0,03	0,09	–	0,62	0,04	0,01	–
59	Пермский край [Perm Territory]	0,62	0,02	0,06	0,05	0,41	0,02	0,05	0,01
60	Псковская область [Pskov Region]	0,67	0,02	0,09	0,05	0,49	0,01	0,01	–
61	Ростовская область [Rostov Region]	0,66	0,02	0,05	0,01	0,44	0,05	0,09	–
62	Рязанская область [Ryazan Region]	0,94	0,03	0,08	0,02	0,69	0,11	0,01	0,02
63	Самарская область [Samara Region]	1,00	0,03	0,07	0,02	0,74	0,03	0,12	–

Код [Code]	Субъект РФ [Region of RF]	Всего [Total]	ФГ [FG]	РГ [RG]	РС [FL]	КТ [CT]	СИ [IR]	РН [NM]	Прочие [Other]
мЗв на жителя [mSv per inhabitant]									
64	Саратовская область [Saratov Region]	0,64	0,07	0,11	0,04	0,39	0,03	–	–
65	Сахалинская область [Sakhalin Region]	1,19	0,02	0,06	–	1,11	–	–	–
66	Свердловская область [Sverdlovsk Region]	0,88	0,03	0,10	0,02	0,60	0,06	0,06	–
67	Смоленская область [Smolensk Region]	0,52	0,04	0,08	0,01	0,38	–	–	–
68	Тамбовская область [Tambov Region]	0,77	0,02	0,09	0,01	0,49	0,07	0,10	–
69	Тверская область [Tver Region]	0,94	0,03	0,12	0,01	0,77	–	–	–
70	Томская область [Tomsk Region]	0,56	0,02	0,07	0,01	0,39	0,02	0,04	–
71	Тульская область [Tula Region]	0,94	0,03	0,09	0,01	0,70	0,06	0,05	–
72	Тюменская область [Tyumen Region]	1,12	0,02	0,06	0,06	0,89	0,03	0,05	–
73	Ульяновская область [Ulyanovsk Region]	0,95	0,02	0,09	0,02	0,79	–	0,03	–
74	Челябинская область [Chelyabinsk Region]	0,78	0,03	0,08	0,02	0,57	0,06	0,01	0,01
75	Забайкальский край [Trans-Baikal Territory]	0,54	0,03	0,08	0,03	0,39	–	0,01	–
76	Ярославская область [Yaroslavl Region]	0,74	0,02	0,10	0,01	0,51	0,03	0,06	–
77	г. Москва [Moscow]	1,71	0,02	0,08	0,03	1,33	0,12	0,12	–
78	г. Санкт-Петербург [St. Petersburg]	1,18	0,03	0,08	0,03	0,84	0,12	0,08	–
79	Еврейская автономная область [Jewish Autonomous Region]	0,25	0,02	0,05	–	0,19	–	–	–
82	Республика Крым [Republic of Crimea]	0,30	0,02	0,02	–	0,20	0,06	–	–
83	Ненецкий автономный округ [Nenets Autonomous Area]	1,32	0,03	0,06	0,02	1,21	–	–	–
86	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра [Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra]	1,09	0,02	0,06	0,01	0,91	0,09	0,01	–
87	Чукотский автономный округ [Chukotka Autonomous Area]	0,58	0,02	0,05	–	0,50	–	–	–
89	Ямало-Ненецкий автономный округ [Yamal-Nenets Autonomous Area]	0,80	0,03	0,06	–	0,71	–	–	–
92	г. Севастополь [Sevastopol]	0,48	0,01	0,05	0,06	0,32	0,03	–	–
	ИТОГО: [TOTAL]	0,86	0,03	0,08	0,02	0,63	0,06	0,04	0,00

ФГ – флюорограммы; РГ- рентгенограммы; РС – рентгеноскопии; КТ – компьютерная томография; РН – радионуклидные исследования; СИ – специальные исследования
 [FG – fluorography; RG- radiography; FL – Fluoroscopy; CT – computed tomography; IR – interventional examinations; NM – nuclear medicine].

Таблица 7

Средние по СРФ дозы медицинского облучения в расчете на 1 рентгенологическую диагностическую процедуру, проведенную в 2022 г. в медицинских учреждениях, надзор за которыми осуществляют Роспотребнадзор, ФМБА, МВД и ФСИН, мЗв

[Table 7]

Mean data for the regions of the Russian Federation on the doses from medical exposure per one medical X-ray examination performed in 2022 in medical facilities supervised by Rosbotrebnadzor, FBMA, MVM and FSIN, mSv

Код [Code]	Субъект РФ [Region of RF]	Всего [Total]	ФГ [FG]	РГ [RG]	РС [FL]	КТ [CT]	СИ [IR]	РН [NM]	Прочие [Other]
		мЗв на жителя [mSv per inhabitant]							
01	Республика Адыгея [Republic of Adygeya]	0,96	0,15	0,07	1,46	5,43	7,69	–	–
02	Республика Башкортостан [Republic of Bashkortostan]	0,59	0,12	0,07	2,65	3,38	2,06	9,35	8,53
03	Республика Бурятия [Republic of Buryatia]	0,24	0,04	0,04	4,55	2,42	4,21	2,81	0,09
04	Республика Алтай [Republic of Altai]	0,40	0,05	0,04	–	4,87	–	–	–
05	Республика Дагестан [Republic of Daghestan]	0,42	0,08	0,08	0,75	4,73	3,38	–	–
06	Республика Ингушетия [Republic of Ingushetia]	0,73	0,05	0,04	–	5,26	–	–	–
07	Кабардино-Балкарская Республика [Kabardino-Balkarian Republic]	0,44	0,05	0,07	2,26	4,39	5,72	–	1,81
08	Республика Калмыкия [Republic of Kalmykia]	0,68	0,05	0,04	–	5,33	5,85	–	–
09	Карачаево-Черкесская Республика [Karachayevo-Circassian Republic]	0,59	0,05	0,05	0,71	4,34	–	–	–
10	Республика Карелия [Republic of Karelia]	0,67	0,02	0,06	3,86	5,92	16,4	2,39	–
11	Республика Коми [Komi Republic]	0,38	0,05	0,05	3,81	3,46	3,21	–	4,93
12	Республика Марий Эл [Republic of Mari El]	0,20	0,06	0,05	1,28	3,28	0,20	–	0,16
13	Республика Мордовия [Republic of Mordovia]	0,57	0,05	0,06	3,22	4,83	3,11	6,20	0,04
14	Республика Саха (Якутия) [Republic of Sakha (Yakutia)]	0,60	0,05	0,06	1,20	5,03	5,36	1,29	2,91
15	Республика Северная Осетия – Алания [Republic of North Ossetia – Alania]	0,67	0,18	0,09	1,75	4,41	4,66	–	–
16	Республика Татарстан [Republic of Tatarstan]	0,33	0,05	0,05	1,56	3,16	4,70	1,47	0,03
17	Республика Тыва [Republic of Tuva]	0,29	0,08	0,06	–	4,40	–	–	–
18	Удмуртская Республика [Udmurtian Republic]	0,37	0,05	0,06	5,97	4,22	5,42	2,25	0,19
19	Республика Хакасия [Republic of Khakassia]	0,37	0,06	0,06	1,00	4,32	1,47	–	0,27
20	Чеченская Республика [Chechen Republic]	0,12	0,05	0,04	–	2,38	–	–	–
21	Чувашская Республика – Чувашия [Chuvash Republic]	0,34	0,05	0,05	2,67	3,77	5,92	2,18	–
22	Алтайский край [Altai Territory]	0,30	0,05	0,09	3,57	4,46	5,99	1,59	–
23	Краснодарский край [Krasnodar Territory]	0,66	0,06	0,07	3,14	4,45	7,44	9,55	0,18

Продолжение таблицы 7

Код [Code]	Субъект РФ [Region of RF]	Всего [Total]	ФГ [FG]	РГ [RG]	РС [FL]	КТ [CT]	СИ [IR]	РН [NM]	Прочие [Other]
мЗв на жителя [mSv per inhabitant]									
24	Красноярский край [Krasnoyarsk Territory]	0,34	0,05	0,08	4,61	3,23	9,70	2,31	0,33
25	Приморский край [Primorye Territory]	0,30	0,05	0,05	1,33	3,53	1,28	–	–
26	Ставропольский край [Stavropol Territory]	0,40	0,07	0,09	3,94	3,92	4,89	9,96	0,21
27	Хабаровский край [Khabarovsk Territory]	0,58	0,05	0,05	3,47	4,57	2,27	11,3	6,07
28	Амурская область [Amur Region]	0,30	0,02	0,06	2,26	2,77	5,85	3,18	–
29	Архангельская область [Arkhangelsk Region]	0,36	0,05	0,06	2,13	3,56	5,30	3,26	3,57
30	Астраханская область [Astrakhan Region]	0,41	0,04	0,07	1,82	3,87	0,33	17,6	–
31	Белгородская область [Belgorod Region]	0,55	0,04	0,07	2,29	5,02	9,68	4,50	0,02
32	Брянская область [Bryansk Region]	0,40	0,05	0,06	2,10	4,63	5,47	2,47	0,19
33	Владимирская область [Vladimir Region]	0,47	0,04	0,05	2,43	3,46	13,7	30,1	–
34	Волгоградская область [Volgograd Region]	0,39	0,09	0,07	3,04	3,62	4,11	2,54	0,52
35	Вологодская область [Vologda Region]	0,24	0,04	0,07	2,52	3,89	3,62	2,11	7,40
36	Воронежская область [Voronezh Region]	0,32	0,03	0,06	1,24	2,68	1,81	3,17	0,00
37	Ивановская область [Ivanovo Region]	0,27	0,04	0,06	2,34	2,29	7,67	23,2	0,03
38	Иркутская область [Irkutsk Region]	0,37	0,05	0,07	2,39	4,00	3,95	2,24	4,06
39	Калининградская область [Kaliningrad Region]	0,42	0,08	0,11	3,89	2,65	2,09	3,23	–
40	Калужская область [Kaluga Region]	0,52	0,04	0,08	2,11	3,45	7,67	9,26	4,71
41	Камчатский край [Kamchatka Territory]	0,22	0,05	0,04	2,50	2,65	2,24	3,33	–
42	Кемеровская область [Kemerovo Region]	0,25	0,03	0,06	2,28	3,64	1,98	3,29	0,92
43	Кировская область [Kirov Region]	0,31	0,07	0,07	2,99	3,70	2,96	11,4	0,01
44	Костромская область [Kostroma Region]	0,28	0,04	0,05	1,19	3,88	2,24	–	0,82
45	Курганская область [Kurgan Region]	0,18	0,02	0,05	1,64	1,96	0,87	4,44	4,44
46	Курская область [Kursk Region]	0,62	0,04	0,06	3,33	5,35	5,62	15,2	–
47	Ленинградская область [Leningrad Region]	0,46	0,05	0,04	1,94	4,38	6,08	–	0,05
48	Липецкая область [Lipetsk Region]	0,49	0,05	0,06	1,84	4,95	5,81	12,6	–
49	Магаданская область [Magadan Region]	0,46	0,03	0,06	4,21	3,37	5,34	2,53	–

ЕСКИД и радиационно-гигиеническая паспортизация
Продолжение таблицы 7

Код [Code]	Субъект РФ [Region of RF]	Всего [Total]	ФГ [FG]	РГ [RG]	РС [FL]	КТ [CT]	СИ [IR]	РН [NM]	Прочие [Other]
мЗв на жителя [mSv per inhabitant]									
50	Московская область [Moscow Region]	0,48	0,05	0,06	1,15	3,68	4,91	6,38	6,87
51	Мурманская область [Murmansk Region]	0,40	0,05	0,06	1,47	4,16	3,07	2,80	0,34
52	Нижегородская область [Nizhny Novgorod Region]	0,34	0,06	0,07	2,80	3,90	4,79	1,00	7,90
53	Новгородская область [Novgorod Region]	0,24	0,05	0,05	3,27	3,06	5,32	2,57	–
54	Новосибирская область [Novosibirsk Region]	0,19	0,05	0,06	2,27	2,31	1,99	2,20	3,25
55	Омская область [Omsk Region]	0,47	0,08	0,09	1,36	3,43	16,5	2,23	1,06
56	Оренбургская область [Orenburg Region]	0,27	0,08	0,05	1,39	2,13	1,71	2,37	–
57	Орловская область [Orel Region]	0,34	0,06	0,08	2,42	3,25	5,71	0,10	–
58	Пензенская область [Penza Region]	0,32	0,04	0,06	0,45	2,53	1,28	3,58	–
59	Пермский край [Perm Territory]	0,27	0,05	0,04	3,45	2,47	2,19	15,8	0,88
60	Псковская область [Pskov Region]	0,40	0,06	0,08	3,82	4,10	0,14	2,95	0,12
61	Ростовская область [Rostov Region]	0,43	0,05	0,05	2,94	3,48	5,11	19,5	–
62	Рязанская область [Ryazan Region]	0,51	0,06	0,07	2,65	3,78	6,21	4,38	5,31
63	Самарская область [Samara Region]	0,44	0,04	0,05	2,39	4,76	3,78	17,2	0,76
64	Саратовская область [Saratov Region]	0,25	0,07	0,07	2,10	4,08	4,42	1,86	–
65	Сахалинская область [Sakhalin Region]	0,60	0,05	0,05	3,33	4,95	–	–	–
66	Свердловская область [Sverdlovsk Region]	0,35	0,05	0,06	2,09	3,32	3,77	12,4	0,56
67	Смоленская область [Smolensk Region]	0,30	0,08	0,07	2,87	3,10	–	0,87	–
68	Тамбовская область [Tambov Region]	0,38	0,03	0,07	1,86	4,41	7,82	16,0	–
69	Тверская область [Tver Region]	0,51	0,07	0,11	1,23	4,27	–	–	–
70	Томская область [Tomsk Region]	0,22	0,03	0,04	3,37	1,91	2,31	3,25	–
71	Тульская область [Tula Region]	0,46	0,05	0,07	2,94	4,41	4,78	13,6	–
72	Тюменская область [Tyumen Region]	0,43	0,04	0,04	1,88	2,96	5,28	4,19	0,06
73	Ульяновская область [Ulyanovsk Region]	0,50	0,05	0,08	1,93	4,51	–	4,35	–
74	Челябинская область [Chelyabinsk Region]	0,36	0,05	0,06	2,40	4,13	4,06	2,39	1,11
75	Забайкальский край [Trans-Baikal Territory]	0,27	0,05	0,07	0,69	2,62	–	2,24	–

Код [Code]	Субъект РФ [Region of RF]	Всего [Total]	ФГ [FG]	РГ [RG]	РС [FL]	КТ [CT]	СИ [IR]	РН [NM]	Прочие [Other]
мЗв на жителя [mSv per inhabitant]									
76	Ярославская область [Yaroslavl Region]	0,37	0,05	0,07	2,31	3,75	4,25	15,9	0,50
77	г. Москва [Moscow]	0,74	0,05	0,06	1,81	4,63	5,12	9,61	0,29
78	г. Санкт-Петербург [St. Petersburg]	0,45	0,05	0,04	2,89	3,91	6,18	6,33	0,09
79	Еврейская автономная область [Jewish Autonomous Region]	0,14	0,04	0,04	–	2,43	–	–	–
82	Республика Крым [Republic of Crimea]	0,53	0,18	0,05	5,75	4,47	10,6	–	–
83	Ненецкий автономный округ [Nenets Autonomous Area]	0,57	0,06	0,04	1,95	6,25	–	–	–
86	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра [Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra]	0,51	0,04	0,04	2,99	4,01	5,90	1,98	1,42
87	Чукотский автономный округ [Chukotka Autonomous Area]	0,30	0,05	0,04	–	5,01	–	–	–
89	Ямало-Ненецкий автономный округ [Yamal-Nenets Autonomous Area]	0,48	0,05	0,07	2,40	4,88	–	–	2,83
92	г. Севастополь [Sevastopol]	0,32	0,06	0,04	7,59	2,33	9,48	–	0,01
	ИТОГО: [TOTAL]	0,43	0,05	0,06	2,35	3,86	4,89	8,07	1,04

ФГ – флюорограммы; РГ – рентгенограммы; РС – рентгеноскопии; КТ – компьютерная томография; РН – радионуклидные исследования; СИ – специальные исследования
[FG – fluorography; RG – radiography; FL – Fluoroscopy; CT – computed tomography; IR – interventional examinations; NM – nuclear medicine].

Из таблицы 6 видно, что максимальные годовые эффективные дозы медицинского облучения в среднем на 1 жителя в 2022 г. были зарегистрированы в г. Москве (1,71 мЗв), Республике Карелия (1,5 мЗв), Ненецком автономном округе (1,32 мЗв), Хабаровском крае (1,26 мЗв), Мурманской (1,23 мЗв) и Магаданской (1,20 мЗв) областях. Еще в 15 СРФ годовые эффективные дозы медицинского облучения в среднем на 1 жителя в 2022 г. превысили 1 мЗв при среднем значении по Российской Федерации 0,86 мЗв/год. Максимальный вклад в среднюю суммарную дозу на жителя в названных регионах дает компьютерная томография.

Как видно из таблицы 7, максимальные средние по СРФ дозы на процедуру в 2022 г. были зарегистрированы:

- при флюорографии в Республиках Северная Осетия (0,18 мЗв), Крым (0,18 мЗв) и Адыгея (0,15 мЗв) при среднем значении по РФ 0,05 мЗв;
- при рентгенографии в Калининградской (0,11 мЗв) и в Тверской (0,11 мЗв) областях при среднем значении по РФ 0,06 мЗв;
- при рентгеноскопии в Севастополе (7,59 мЗв), в Удмуртской Республике (5,97 мЗв) и в Республике Крым (5,75 мЗв) при среднем значении по РФ 2,35 мЗв;
- при компьютерной томографии в Ненецком АО (6,25 мЗв), в Республиках Карелия (5,92 мЗв) и Адыгея (5,43 мЗв) при среднем значении по РФ 3,86 мЗв;

– при специальных исследованиях в Омской области (16,5 мЗв), в Республике Карелия (16,4 мЗв) и во Владимирской области (13,7 мЗв) при среднем значении по РФ 4,89 мЗв;

– при радионуклидной диагностике во Владимирской (30,1 мЗв), Ивановской (23,2 мЗв) и Ростовской (19,5 мЗв) областях при среднем значении по РФ 8,07 мЗв;

– при прочих рентгенорадиологических процедурах в Республике Башкортостан (8,53 мЗв), Нижегородской (7,90 мЗв) и Вологодской (7,40 мЗв) областях при среднем значении по РФ 1,04 мЗв;

– при всех видах рентгенорадиологических процедур в Республике Адыгея (0,96 мЗв), в Москве (0,74 мЗв) и в Республике Ингушетия (0,73 мЗв) при среднем значении по РФ 0,43 мЗв.

Как видно, максимальная средняя по СРФ доза медицинского облучения в расчете на процедуру превышает среднее по РФ значение в 2,2 раза, а в расчете на жителя – в 2 раза, что можно считать вполне удовлетворительным результатом с учетом существенной разницы в структуре рентгенодиагностики различных СРФ.

Заключение

Как показал проведенный анализ, объемы и структура рентгенорадиологических диагностических медицинских исследований в РФ в 2022 г. постепенно возвращаются

к «доковидным» величинам, что объясняется восстановлением в 2022 г. объемов плановой медицинской помощи населению, в том числе и процедур лучевой диагностики, и возвратом медицинских организаций к нормальному режиму работы. Тем не менее, число выполненных в 2022 г. процедур, за исключением компьютерной томографии и радионуклидных исследований, все еще несколько ниже аналогичных показателей 2019 г. Сохраняется тенденция преимущественного роста количества проведенных компьютерных томографий, количество которых хотя и несколько снизилось в 2022 г. по сравнению с их аномальным ростом в 2021 г., но возросло по сравнению с 2020 г. Несколько вырос процент измеренных доз пациентов до 82%, но 18% доз пациентов все еще получают расчетными методами с использованием среднероссийских значений, т.е. никак не связаны с реальными дозами конкретных пациентов. По мере роста доз медицинского облучения населения РФ все более актуальной становится задача оптимизации рентгенодиагностических исследований для недопущения необоснованного роста доз медицинского облучения без потери качества получаемой диагностической информации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Братилова А.А. – сбор и систематизация данных, поиск литературных источников, обработка полученных результатов.

Барковский А.Н. – общее и научное руководство проектом, разработка концепции изложения материалов исследования, содержательное редактирование текста статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках НИР «Развитие радиационно-гигиенической паспортизации как информационной основы комплексного анализа состояния радиационной безопасности в субъектах Российской Федерации и в России в целом с использованием методологии оценки радиационного риска для здоровья населения России и ГИС-технологий»

Литература

1. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2018 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019. 130 с.
2. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2019 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020. 136 с.
3. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 138 с.
4. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2021 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 138 с.
5. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2022 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023. 137 с.
6. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб, 2019. 71 с.
7. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб, 2020. 70 с.
8. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: информационный сборник. СПб, 2021. 80 с.
9. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году: справочник. СПб, 2022. 76 с.
10. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 103-113. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-103-113>.
11. Дружинина П.С., Романович И.К., Водоватов А.В. и др. Тенденции развития компьютерной томографии в Российской Федерации в 2011–2021 гг. // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 101-117.
12. Попова А.Ю., Водоватов А.В., Романович И.К. и др. Влияние пандемии COVID-19 на структуру лучевой диагностики и коллективные дозы населения Российской Федерации при медицинском облучении в 2020 г. // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 6-39. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-6-39>.

Поступила: 30.10.2023 г.

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

Барковский Анатолий Николаевич – главный научный сотрудник, руководитель Федерального радиологического центра, заведующий лабораторией 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

Для цитирования: Братилова А.А., Барковский А.Н. Медицинское облучение пациентов за счет рентгено-радиологических диагностических процедур, проведенных в 2022 г. в медицинских организациях Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, №4. С. 105-121. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-105-121

Medical exposure of patients from diagnostic X-ray examinations performed in medical organizations of the Russian Federation in 2022

Anzhelika A. Bratilova, Anatoly N. Barkovsky

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

The paper presents results of analysis of information on doses from medical exposure of the public in the Russian Federation in 2022, submitted via Federal Statistical Surveillance Form No. 3-DOZ "Information on doses to patients from medical X-ray examinations" to the Federal Databank on medical exposure doses, which operates on the base of Institute of Radiation Hygiene after P.V. Ramzaev, as well as received as part of radiation-hygienic passportization from the Federal Medical and Biological Agency of the Russian Federation, the Ministry of Defense of the Russian Federation, and the Federal Service for the Execution of Punishments of the Russian Federation. The data on the structure of doses from medical exposure of the public in the regions of the Russian Federation and Russia as a whole in 2022, as well as on the dynamics of these indicators for the last 5 years are presented. The average dose from medical exposure of the public of the Russian Federation in 2022 amounted to 0.86 mSv/year per one inhabitant and 0.43 mSv per one procedure. The highest values of the average dose per inhabitant in 2022 were in Moscow (1.71 mSv), in the Republic of Karelia (1.5 mSv), in the Nenets Autonomous District (1.32 mSv), in the Khabarovsk Krai (1.26 mSv), in the Murmansk Region (1.23 mSv) and in the Magadan region (1.20 mSv). In another 15 regions of the Russian Federation, annual effective doses from medical radiation exposure exceeded 1 mSv per inhabitant on average in 2022. The highest values of the average dose per procedure in 2022 were observed in the Republic of Adygea (0.96 mSv), in Moscow (0.74 mSv) and in the Republic of Ingushetia (0.73 mSv). The highest values of average doses were observed: for fluorography in the Republics of North Ossetia (0.18 mSv), Crimea (0.18 mSv) and Adygea (0.15 mSv), with an average value for the Russian Federation being 0.05 mSv; for radiography in the Kaliningrad (0.11 mSv) and Tver (0.11 mSv) regions, with the average value for the Russian Federation being 0.06 mSv; - for fluoroscopy in Sevastopol (7.59 mSv), in the Udmurt Republic (5.97 mSv) and in the Republic of Crimea (5.75 mSv), with the average value for the Russian Federation being 2.35 mSv; for computer tomography in the Nenets Autonomous District (6.25 mSv), in the Republics of Karelia (5.92 mSv) and Adygea (5.43 mSv), with the average value for the Russian Federation being 3.86 mSv; for interventional examinations in the Omsk Region (16.5 mSv), in the Republic of Karelia (16.4 mSv) and in the Vladimir Region (13.7 mSv), with the average value for the Russian Federation being 4.89 mSv; for diagnostic nuclear medicine in the Vladimir region (30.1 mSv), Ivanovo region (23.2 mSv) and Rostov region (19.5 mSv), with the average value for the Russian Federation being 8.07 mSv; for other radiology procedures in the Republic of Bashkortostan (8.53 mSv), Nizhny Novgorod (7.90 mSv) and Vologda (7.40 mSv) regions, with the average value for the Russian Federation being 1.04 mSv. The maximum average dose from medical exposure per procedure exceeds the average for the Russian Federation by a factor of 2.2, and per inhabitant – by a factor of 2, which can be considered quite a satisfactory result considering the significant difference in the structure of their X-ray diagnostics.

Key words: Unified State System of Control and Registration of Individual Doses to Citizens (USCID), Form No. 3-DOZ, patient doses from medical exposure, mean annual effective dose from medical exposure, collective dose from medical exposure.

Anzhelika A. Bratilova

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

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

Information about personal contribution of the authors

Bratilova A.A. – collection and systematization of data, search of literature sources, processing of the obtained results.

Barkovsky A.N. – general and scientific management of the project, development of the concept of presentation of the research materials, substantive editing of the text of the article.

Information on conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Information about the source of funding

The work was carried out within the framework of the Scientific project “Development of radiation-hygienic passportization as an information basis for comprehensive analysis of the state of radiation safety in the subjects of the Russian Federation and in Russia as a whole using the methodology of radiation risk assessment for the health of the population of Russia and GIS-technologies”

References

1. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2018 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2019. 130 p.
2. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2019 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2020. 136 p.
3. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2020 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2021. 138 p.
4. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2021 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2022. 138 p.
5. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2022 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2023. 137 p.
6. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2018: information collection. St. Petersburg; 2019. 71 p.
7. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2019: information collection. St. Petersburg; 2020. 70 p.
8. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2020: information collection. St. Petersburg; 2021. 80 p.
9. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2021: information collection. St. Petersburg; 2022. 76 p.
10. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 103-113. (In Russian).
11. Druzhinina PS, Romanovich IK, Vodovatov AV, Chipiga LA, Akhmatdinov RR, Bratilova AA, et al. Trends in the development of computed tomography in the Russian Federation in 2011–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 101-117. (In Russian).
12. Popova AY, Vodovatov AV, Romanovich IK, Ryzhov SA, Druzhinina PS, Akhmatdinov RR. The impact of the COVID-19 pandemic on the structure of radiation diagnostics and collective doses of the population of the Russian Federation under medical irradiation in 2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 6-39. (In Russian).

Received: October 30, 2023

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

Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Center, Chief Scientific Officer of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Bratilova A.A., Barkovsky A.N. Medical exposure of patients from diagnostic X-ray examinations performed in medical organizations of the Russian Federation in 2022. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 105-121. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-105-121

Сравнительный анализ информации о радиационных авариях в Российской Федерации в 2010–2022 гг.

А.В. Громов¹, Р.Р. Ахматдинов¹, А.М. Библин¹, О.Е. Тутельян²

¹Санкт-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

²Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

В работе проведены обобщение, анализ и гигиеническая оценка сведений о радиационных авариях и инцидентах, произошедших на территории Российской Федерации за период с 2010 по 2022 г., представленных в банке данных радиационных аварий и инцидентов Информационно-аналитического центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности в форме федерального статистического наблюдения № 18 «Сведения о санитарном состоянии субъекта Российской Федерации», в радиационно-гигиенических паспортах территорий. Цель исследования состояла в проведении сравнительного анализа информации о радиационных авариях за период с 2010 по 2022 г., содержащейся в вышеуказанных источниках. Сравнение количества радиационных аварий в динамике показало расхождение данных между исследуемыми источниками информации, отсутствие системности этих расхождений, разнонаправленности тенденций изменения числа радиационных аварий. За рассматриваемый период в банке данных зарегистрировано 2690 случаев радиационных аварий в 71 субъекте Российской Федерации, по данным из формы № 18 – 2469 случаев в 67 субъектах, по данным из радиационно-гигиенического паспорта территорий – 2457 случаев в 76 субъектах. Установлены различия в структуре предоставления данных: в банке данных и форме № 18 радиационные аварии классифицированы, но при этом принципы классификации совпадают частично; в радиационно-гигиеническом паспорте территорий какая-либо классификация отсутствует. Анализ показал, что за исследуемый период из 4 регионов не поступала информация о случаях возникновения радиационных аварий; из представивших информацию субъектов только в 6 регионах отмечается совпадение данных по всем источникам; выявлены отдельные регионы, где информация предоставляется в одни источники, но не предоставляется в другие; в 5 регионах выявлен размах более чем в 50 случаев; в 53 субъектах коэффициент вариации по количеству радиационных аварий между источниками превысил 33%. Выявленные расхождения демонстрируют отсутствие системного подхода к порядку предоставления сведений о радиационных авариях, что может быть связано с невыполнением в полной мере требований по предоставлению информации в Роспотребнадзор и Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, с противоречиями в перечне подлежащей предоставлению информации в нормативно-правовых актах Роспотребнадзора, а также со сложностями в определении Управлениями Роспотребнадзора по субъектам РФ того, какая информация подлежит передаче в ту или иную форму статистического наблюдения.

Ключевые слова: внеочередные донесения, радиационная авария, инцидент, радиационно-гигиенический паспорт территорий, форма федерального статистического наблюдения № 18.

Введение

Радиационные аварии (РА) являются неизбежной составляющей широкого использования ИИИ в различных отраслях промышленности, здравоохранении и науке.

В соответствии с определением ФЗ-3 «О радиационной безопасности населения»¹ РА – «потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или

¹ Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.1996 г.: в редакции от 18.03.2023 г. [Federal Law «On Radiation Safety of the Population» No. 3-FZ of 09.01.1996: as amended on 18.03.2023. (In Russ.)]

Громов Алексей Валерьевич

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

иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей выше установленных норм или к радиоактивному загрязнению окружающей среды». Схожее определение используется в Приложении 7 к НРБ-99/2009². Оно в значительной мере соотносится с определением термина «Авария», приведенном как в глоссарии МАГАТЭ 2018 г. [1], так и в заменившем его глоссарии 2022 г. выпуска [2]. В данных документах под аварией подразумевается «любое носящее непреднамеренный характер событие, включая ошибки во время эксплуатации, отказы оборудования и другие неполадки, реальные или потенциальные последствия которого не являются пренебрежимо малыми с точки зрения защиты или безопасности». МАГАТЭ отдельно использует термин «Инцидент», который представляет собой «любое носящее непреднамеренный характер событие, включая ошибки во время эксплуатации, отказы оборудования, исходные события, события – предшественники аварии, почти случившиеся события или другие неполадки, или несанкционированные действия злоумышленного или незлоумышленного характера, реальные или потенциальные последствия которых не являются пренебрежительно малыми с точки зрения защиты и безопасности» [1, 2].

Проблематика терминологии в области аварийного реагирования в свете ведущейся работы по переработке ФЗ-3 «О радиационной безопасности населения» является предметом широкой научной дискуссии [3, 4].

Важность учета РА для целей последующего анализа и принятия управленческих решений является одним из критериев оценки эффективности системы обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

На межгосударственном уровне 3 системы учета и анализа ядерных событий функционируют на базе МАГАТЭ [5]. Швейцарской высшей технической школой Цюриха ведется открытая база данных ядерных событий, в которую на 2021 г. были включены 1250 происшествий в ядерной отрасли [6]. Во многих странах мира, включая Российскую Федерацию, США, Канаду, Германию,

Финляндию, Австралию и др., учет аварий и инцидентов ведется на государственном уровне [7–12]. При этом во всех странах применяется собственный подход к классификации радиационных аварий.

В России учет РА ведется Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) в рамках системы радиационно-гигиенической паспортизации³, формы № 18 «Сведения о санитарном состоянии субъекта Российской Федерации»⁴, банка данных радиационных аварий и инцидентов Информационно-аналитического центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности⁵ (БД РАИИ).

На базе ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России с 1985 г. ведется регистр радиационных инцидентов, которые сопровождались медицинскими последствиями [13].

Цель исследования – сравнительный анализ информации о радиационных авариях в Российской Федерации за период с 2010 по 2022 г., содержащейся в официальных источниках информации.

Для сравнительного анализа были выбраны доступные сведения о РА, собираемых Роспотребнадзором. Их особенностью является учет РА и чрезвычайных ситуаций санитарно-эпидемиологического характера, связанных с нарушением правил обращения с источниками ионизирующего излучения (ИИИ)⁶, произошедших на территории Российской Федерации.

Источники информации о радиационных авариях

*Банк данных радиационных аварий
и инцидентов Информационно-аналитического
центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности*

В целях оперативного информирования и своевременной организации соответствующих профилактических мероприятий Постановлением Главного государ-

² СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)», утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47 (зарегистрировано Минюстом России 14.08.2009 г., регистрационный № 14534) [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. (In Russ.)]

³ Методические рекомендации МР 2.6.1.0257-21 «Проведение радиационно-гигиенической паспортизации», утверждены 01.09.2021 г. [Methodical recommendations MR 2.6.1.0257-21 “Conducting radiation-hygienic passportization”, approved on 01.09.2021. (In Russ.)]

⁴ Приказ Росстата от 27 сентября 2022 г. № 654 «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения с указаниями по ее заполнению для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием субъекта Российской Федерации» [Rosstat Order No. 654 of September 27, 2022 “On Approval of the Federal Statistical Observation Form with instructions for its completion for the organization by the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare of the federal statistical observation on the sanitary condition of a subject of the Russian Federation”. (In Russ.)]

⁵ Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 23.12.2013 г. № 968 «О совершенствовании реагирования в случае возникновения радиационной аварии» [Order of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being of 23.12.2013 No. 968 “On Improving Response in the Event of a Radiation Accident”. (In Russ.)]

⁶ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. № 11 «О представлении внеочередных донесений о чрезвычайных ситуациях санитарно-эпидемиологического характера» [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 04.02.2016 No. 11 “On submission of reports on emergencies of sanitary and epidemiological nature”. (In Russ.)]

ственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. № 11⁷ и Приказом Роспотребнадзора от 23.12.2013 г. № 968⁸ установлены необходимость и порядок представления управлениями Роспотребнадзора по субъектам РФ внеочередных донесений о РА. При этом в соответствии с приказом Роспотребнадзора № 968 от 23.12.2013 г. в БД РАиИ, функционирующую на базе ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, подлежит передаче информация о случаях возникновения радиационной аварии, а также выявления фактов утери, хищения, обнаружения радиоактивных источников (материалов), аномалий и фактов выявления продукции, загрязненной радиоактивными веществами выше установленных нормативов, аварии (инциденте, событии) на ядерно-опасном объекте, отнесенной к 0–7 уровням международной шкалы ядерных событий, а в соответствии с Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. № 11, в БД РАиИ подлежит передаче только информация о повышении уровня гамма-фона более чем в 3 раза по сравнению со средним показателем, характерным для данной местности, и выявлении лиц с повышенным уровнем радиационного фона.

Внеочередные донесения предоставляются Управлениями Роспотребнадзора по субъектам РФ в свободной форме, в результате чего отмечается неоднородность поступающей информации, которая имеет различную степень детализации или качества. На основании получаемых в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева внеочередных донесений осуществляется наполнение БД РАиИ, являющегося подсистемой автоматизированной системы контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора [14].

Сведения, содержащиеся в БД РАиИ, используются для подготовки квартальных и годовых сводных материалов о чрезвычайных ситуациях в области радиационной гигиены.

Форма № 18 «Сведения о санитарном состоянии субъекта Российской Федерации»

В разделе 12 формы федерального статистического наблюдения № 18 «Сведения о санитарном состоянии субъекта Российской Федерации» (далее – форма № 18) содержится информация о количестве произошедших РА, дозах облучения населения и персонала и об установленных случаях детерминированных эффектов, полученных в результате РА. В данной форме РА классифицированы по характеру или обстоятельствам выявления РА. Сбор и обработка данных по форме № 18 осуществляется Роспотребнадзором, в частности, Управлениями Роспотребнадзора по субъектам РФ. Первичные статистические данные по форме № 18 предоставляют: ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъекте РФ, Федеральное медико-биологическое агентство, подраз-

деления федеральных органов исполнительной власти в сфере обороны, обеспечения безопасности деятельности войск национальной гвардии РФ, внутренних дел, исполнения наказаний, государственной охраны, внешней разведки, мобилизационной подготовки и мобилизации, Управление делами Президента РФ. Следует отметить, что понятие РА, используемое в форме № 18, соответствует федеральному закону № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения».

Радиационно-гигиенический паспорт территории

Система радиационно-гигиенической паспортизации организаций и территорий функционирует в РФ с момента принятия 9 января 1996 г. Федерального закона «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ, который устанавливает, что результаты оценки радиационной безопасности ежегодно заносятся в радиационно-гигиенические паспорта организаций и территорий (РГПТ). В пункте 7 РГПТ содержится информация об имевших место в отчетном году радиационных авариях и происшествиях. Она формируется путем суммирования данных из радиационно-гигиенических паспортов организаций данного субъекта, данных органов исполнительной власти субъекта Российской Федерации или данных надзорных органов (в случаях возникновения аварии на нерадиационном объекте, например, выявление утерянных радионуклидных источников, радиоактивно загрязненного металлолома). Для каждой аварии указываются дата аварии, организация, в которой произошла авария, и краткое описание аварии.

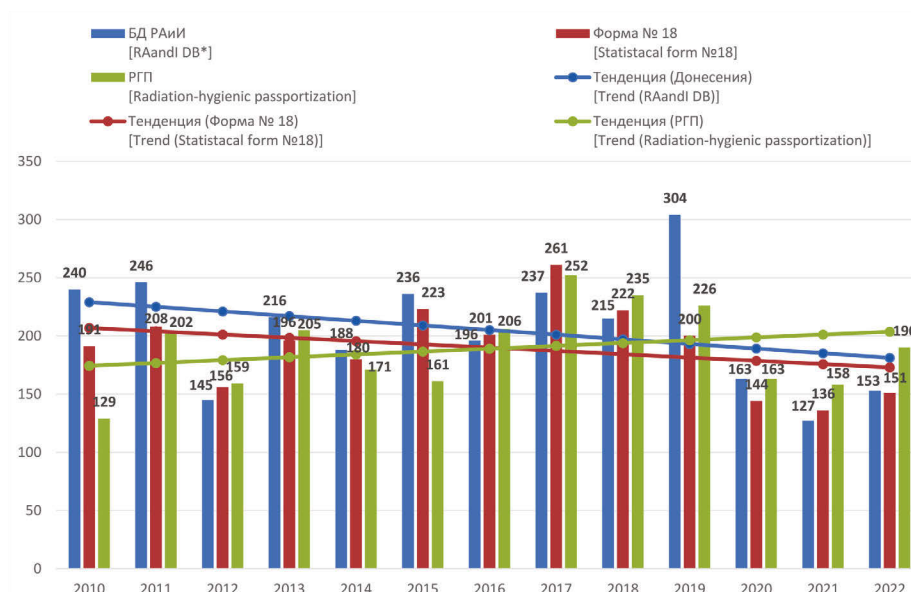
Результаты и обсуждение

Сравнение количества РА в динамике с 2010 по 2022 г. по данным из формы № 18, РГПТ, БД РАиИ приведено на рисунке 1. В первую очередь, обращает на себя внимание расхождение между данными по количеству РА в указанных источниках информации, а также отсутствие системности этих расхождений. Так, если оценивать разницу по отношению к данным из БД РАиИ, то значения, полученные из формы № 18, в отдельные годы были как ниже значений, полученных из БД РАиИ – в среднем на 12%, максимум на 34% (2019 г.), так и выше – в среднем на 7%, максимум на 10% (2017 г.). Схожая ситуация складывается и при сравнении с данными из РГПТ, где в отдельные годы количество РА ниже – в среднем на 23%, максимум на 46% (2010 г.); в другие годы выше – в среднем на 13%, максимум на 24% (2021, 2022 гг.).

Для выявления общей динамики количества РА был рассчитан среднегодовой темп прироста и произведено аналитическое выравнивание динамического ряда методом наименьших квадратов, результаты которого также показаны на рисунке 1. Аналитическое выравнивание

⁷ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. № 11 «О представлении внеочередных донесений о чрезвычайных ситуациях санитарно-эпидемиологического характера» [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 04.02.2016 No. 11 "On submission of reports on emergencies of sanitary and epidemiological nature". (In Russ.)]

⁸ Приказ Роспотребнадзора от 23.12.2013 г. № 968 «О совершенствовании реагирования в случае возникновения радиационной аварии» [Order of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being of 23.12.2013 No. 968 "On Improving Response in the Event of a Radiation Accident". (In Russ.)]



* Radiation accidents and incidents databank of the Information and Analytical Center of Rosпотребнадзор

Рис. 1. Динамика числа РА, зафиксированных в России, по данным БД РАиИ, формы № 18, РГПТ
[Fig. 1. Dynamics of the number of radiation accidents registered in Russia, according to the RAAndI database, statistical form No. 18, and radiation-hygienic passportization]

также позволяет исключить влияние случайных факторов при оценке тенденции изучаемого явления. Полученные результаты оценки свидетельствуют о наличии слабой тенденции к спаду количества РА как по данным из БД РАиИ (средний темп прироста -4%), так и по данным формы № 18 (средний темп прироста -2%). Обратные результаты получены по данным из РГПТ, где, наоборот, наблюдается слабая тенденция к росту количества РА (средний темп прироста 3%). Проведенный анализ показал, что при оценке динамики РА по данным из разных источников официальной статистической информации выявляются противоположные тенденции.

Резкий рост количества РА по данным из БД РАиИ в 2019 г. обусловлен поступлением атипичного количества сообщений о РА, связанных с выявлением лиц, прошедших медицинские радионуклидные процедуры. В 2020–2021 гг. отмечается существенный спад количества РА по данным из всех источников, что, вероятно, может быть связано со снижением производственной активности в связи с началом пандемии COVID-2019.

Одной из объективных причин расхождения между данными из БД РАиИ, РГПТ и формы № 18 является различие в источниках поступления данных:

- в БД РАиИ информация поступает только от Управлений Роспотребнадзора по субъекту РФ, непо-

средственно задействованных в расследовании и ликвидации РА;

- в РГПТ данные поступают от всех юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих обращение с ИИИ и содержащими их изделиями⁹, а также от органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации;

- в форму № 18 данные поступают от Управлений Роспотребнадзора по субъекту РФ, а также от отдельных федеральных органов исполнительной власти и их подразделений.

Необходимо отметить, что в БД РАиИ и форме № 18 разная структура предоставления данных.

В БД РАиИ все случаи РА классифицированы по причинам аварии в соответствии с методическими рекомендациями МР 2.6.1.0050-11¹⁰. На рисунке 2 показано распределение количества зарегистрированных в БД РАиИ случаев РА по причинам их возникновения. Согласно представленным данным, наиболее распространенными причинами РА являются: нарушение правил сбора и оборота металлолома (36%); нарушение правил транспортирования радиоактивных материалов (веществ) (17%); выявление пациентов после радионуклидных процедур (11%); обнаружение бесконтрольного ИИИ (11%). Таким образом, на указанные причины РА приходится 75% всех выявленных случаев.

⁹ Методические рекомендации МР 2.6.1.0257-21 «Проведение радиационно-гигиенической паспортизации», утверждены 01.09.2021 г. [Methodical recommendations MR 2.6.1.0257-21 "Conducting radiation-hygienic passportization", approved on 01.09.2021. (In Russ.)]

¹⁰ 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. М.: ФБУЗ Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. 29 с. [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.)]

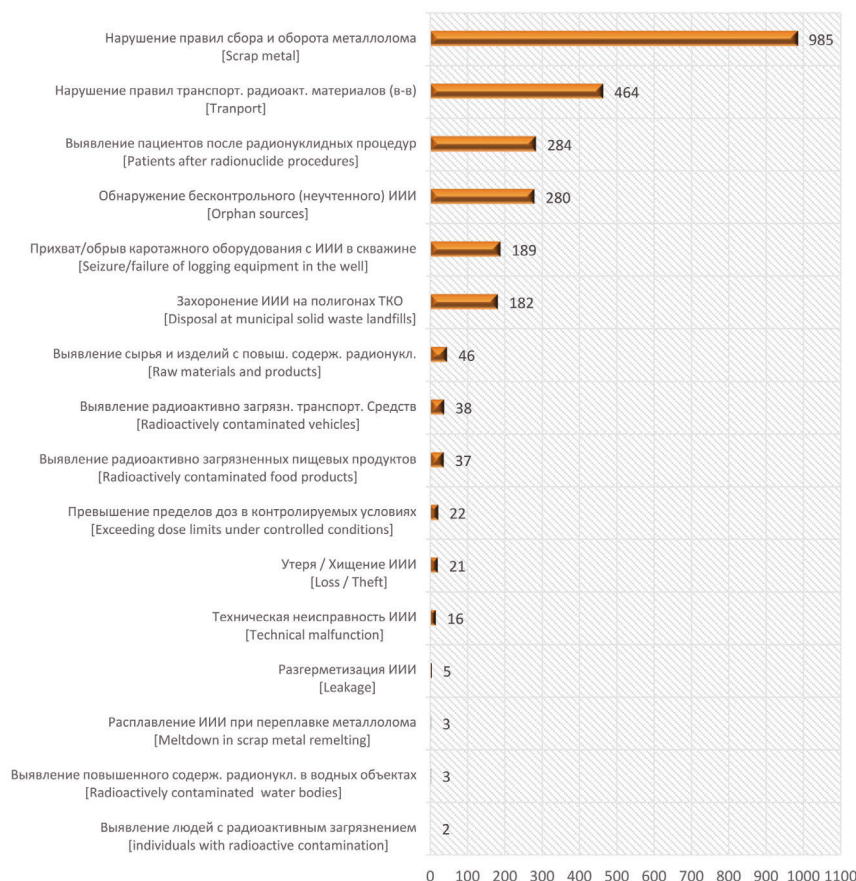


Рис. 2. Распределение РА по причинам по данным из БД РАиИ

[Fig. 2. Distribution of accident by causes according to Radiation accidents and incidents databank of the Information and Analytical Center of Rospotrebnadzor]

РА в форме № 18 сгруппированы иным образом, а именно по характеру или обстоятельствам выявления РА. На рисунке 3 отображено распределение количества зарегистрированных случаев РА в соответствии с формой № 18, согласно которому наиболее распространенными являются РА, связанные с обнаружением, выявлением неконтролируемых ИИИ или радиоактивных загрязнений (84%), в том числе в металлоломе (39%).

Данные по РА, представленные в РГПТ, никаким образом не структурированы и не сгруппированы.

Несмотря на различие в структуре предоставления данных, в БД РАиИ и форме № 18 выделяются отдельные схожие виды РА, к ним относятся: РА, связанные с обнаружением неконтролируемых ИИИ в металлоломе; утеря или хищение ИИИ; РА, связанные с приборами радиационного каротажа; РА при транспортировке радиоактивных материалов (веществ). Представляет интерес сравнить между собой соответствующие виды РА. На рисунке 4 представлены результаты таких сравнительных оценок, согласно которым также установлено расхождение между данными: наименьшая разница отмечается при сравнении РА, связанных с обнаружением неконтролируемых ИИИ в металлоломе, – 2% и РА, связанных с приборами радиационного каротажа, – 9%; наибольшая разница наблюдается при сравнении РА, связанных с транспорти-

ровкой радиоактивных материалов (веществ), – более чем в 25 раз и при утере, хищении ИИИ – 90%.

В БД РАиИ за рассматриваемый период зарегистрировано 2690 сообщений о РА, произошедших в 71 субъекте РФ, среди которых в 24 случаях факт РА не подтвердился (рис. 5). Наибольшее число случаев РА приходится на такие регионы, как: город Москва и город Санкт-Петербург, Московская, Свердловская и Вологодская области, Хабаровский край. На данные регионы приходится более половины всех сообщений о РА (57%).

В РГПТ за период времени с 2010 по 2022 г. содержится информация о 2457 РА по 76 субъектам РФ (рис. 6). Наибольшее число случаев РА в РГПТ приходится на такие регионы, как: города Москва и Санкт-Петербург, Калининградская, Московская и Свердловская области, Ханты-Мансийский автономный округ. На данные регионы приходится более половины всех сообщений о РА (55%).

В форме № 18 за исследуемый период времени учтено 2469 РА в 67 субъектах РФ, из них 48 сообщений о РА поступило от Управления Роспотребнадзора по железнодорожному транспорту (рис. 7). Наибольшее число случаев РА по форме № 18 приходится на города Москва и Санкт-Петербург, Калининградскую, Московскую и Свердловскую области, Хабаровский край. На данные регионы приходится более половины всех сообщений о РА (57%).

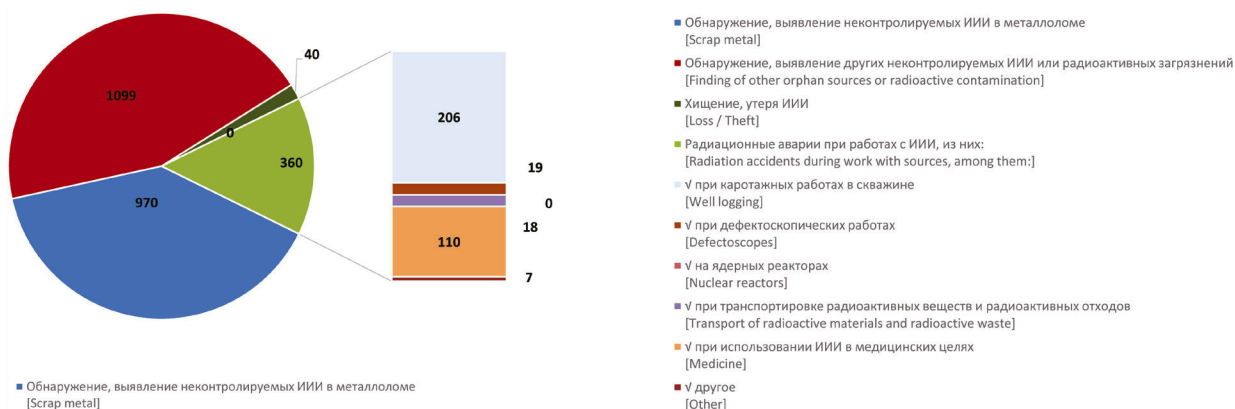
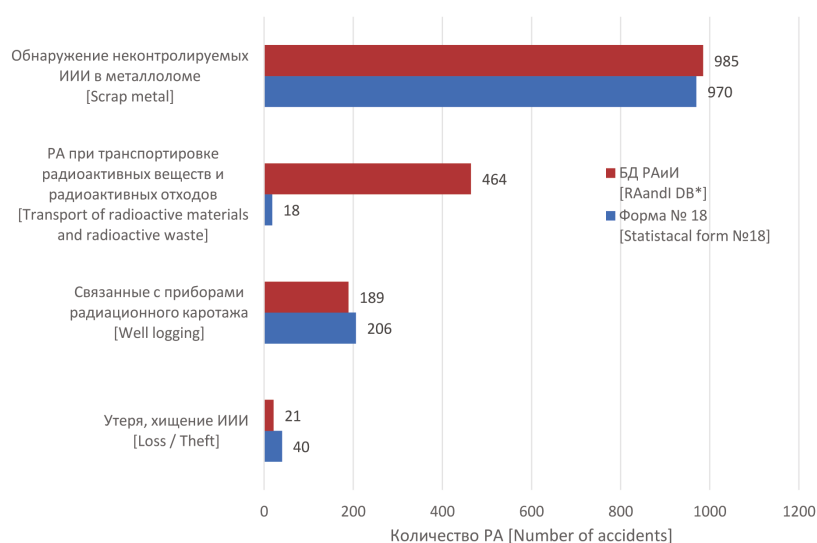


Рис. 3. Распределение зарегистрированных случаев РА по характеру или обстоятельствам выявления радиационной аварии по данным из формы № 18
[Fig. 3. Distribution of radiation accidents by nature or circumstances of identification according to Statistical form No. 18]



* Radiation accidents and incidents databank of the Information and Analytical Center of Rospotrebnadzor

Рис. 4. Сравнение схожих видов РА по данным из БД РАиИ и формы №18
[Fig. 4. Comparison of similar types of radiation accidents according to Radiation accidents and incidents databank of the Information and Analytical Center of Rospotrebnadzor and statistical form No. 18]

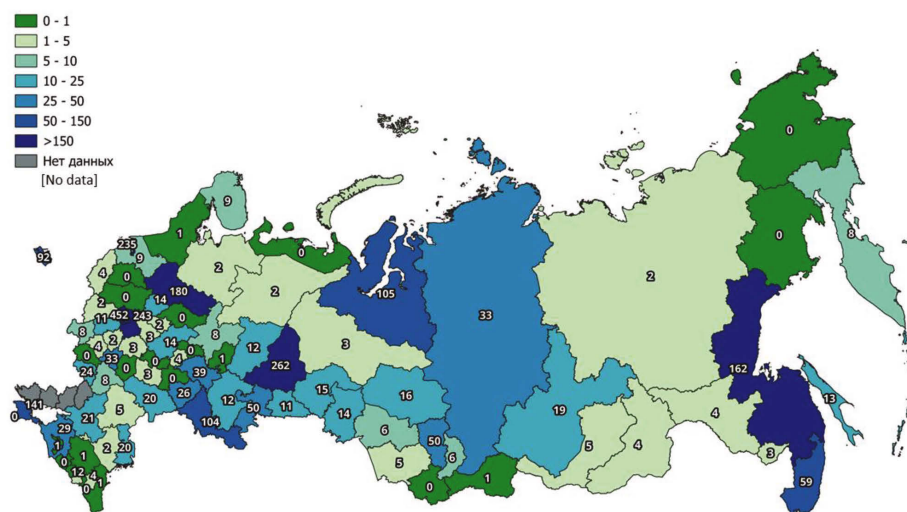


Рис. 5. География распределения количества РА по данным из БД РАиИ
[Fig. 5. Geography of radiation accidents distribution according to Radiation accidents and incidents databank of the Information and Analytical Center of the Rospotrebnadzor]

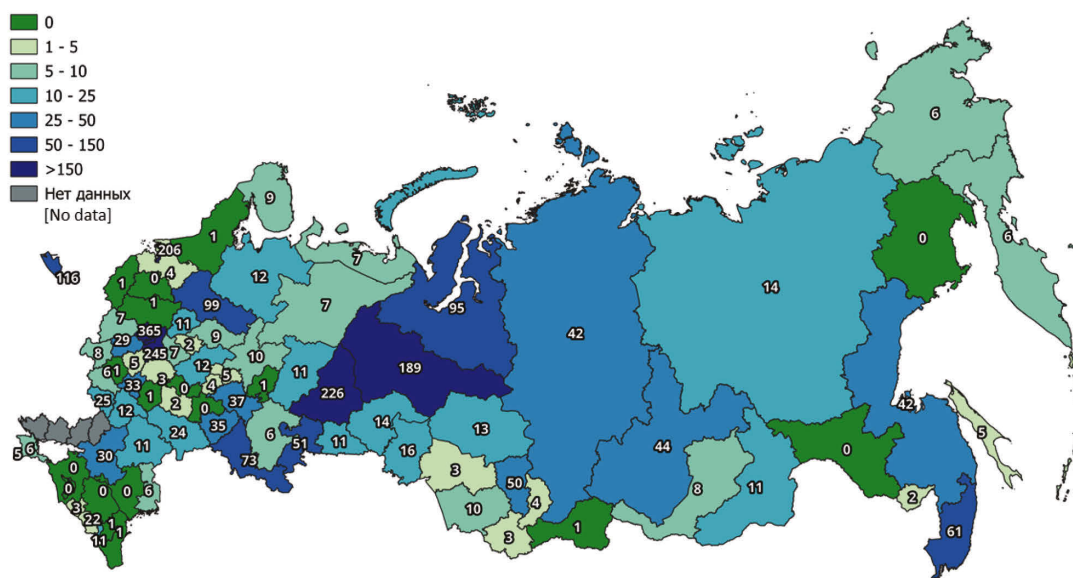


Рис. 6. География распределения количества РА по данным из РГПТ
 [Fig. 6. Geography of radiation accidents distribution according to radiation-hygienic passportization]

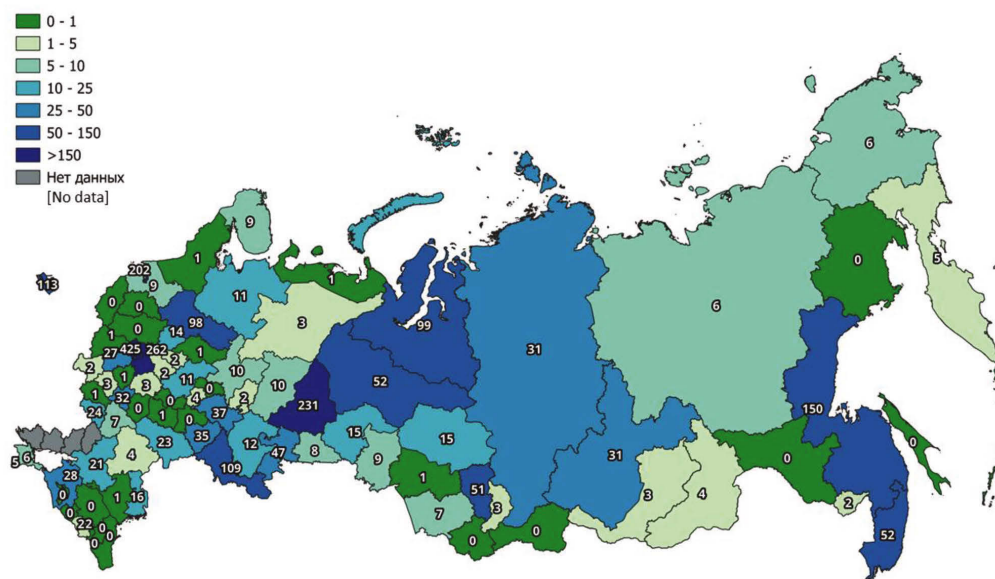


Рис. 7. География распределения количества РА по данным из формы № 18
 [Fig. 7. Geography of radiation accidents distribution according to statistical form No18]

По всем анализируемым источникам за исследуемый период времени 4 субъекта не предоставляли информацию о наличии на своей территории РА: Республика Мордовия, Магаданская, Новгородская и Ульяновская области.

Сведения о РА на своей территории за весь период времени не представляли в РГПТ, но при этом представляли в БД РАиИ или форму № 18 5 субъектов РФ, в форму № 18 – 9 субъектов, в БД РАиИ – 11 субъектов.

Только в 6 регионах информация о количестве РА совпадает во всех анализируемых источниках – это Ивановская, Рязанская и Мурманская области, Республики Карелия и Северная Осетия – Алания, Чувашская Республика.

В 58 регионах размах между представленными данными о количестве РА не превысил 10 случаев, в 13 регионах – 50 случаев. Для 5 регионов выявлен размах более чем в 50 РА. Для ХМАО размах составил 186 РА, Республики Крым – 135, Хабаровского края – 120, Москвы – 87 и Вологодской области – 82. Картографическое представление сведений о размахе представлено на рисунке 8.

Для выявления степени однородности представленных данных для каждого субъекта РФ был определен коэффициент вариации. В 19 субъектах коэффициент вариации составил от 0 до 10%, в 9 – от 10 до 20%, в 6 – от 20 до 33% и в 53 – более 33%.

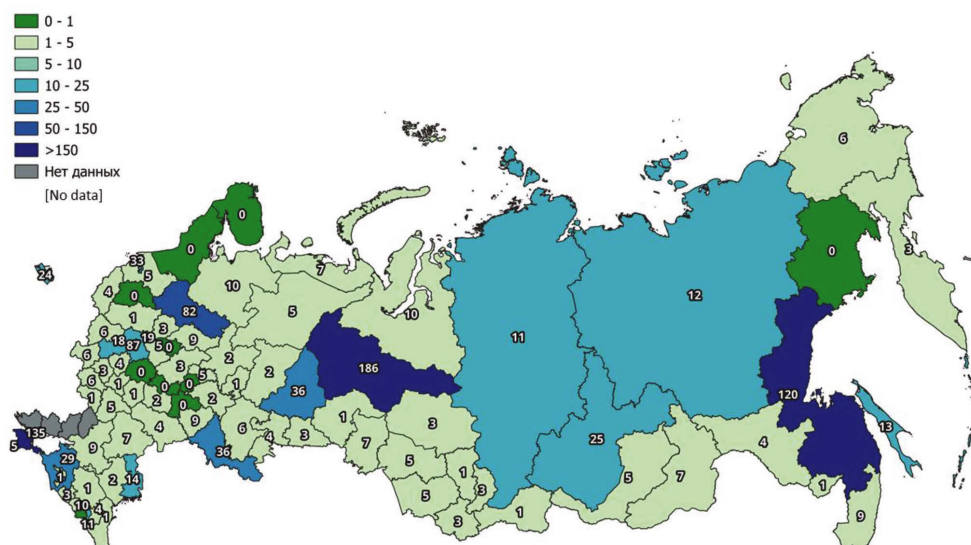


Рис. 8. Размах количества РА в субъектах РФ между рассматриваемыми источниками данных
[Fig. 8. Range of the number of radiation accidents in the Russian Federation subjects between the considered data sources]

Заключение

Результаты исследования позволили выявить ряд критериев, определяющих расхождения в представлении сведений о РА в различных официальных источниках информации:

- во временном интервале за весь анализируемый период времени ни за один год не было выявлено полной сходимости данных о РА между всеми источниками;
- динамика РА по данным из разных источников информации демонстрирует наличие разнонаправленных тенденций: по БД РАиИ и форме № 18 – к незначительному устойчивому снижению; по РГПТ – к незначительному устойчивому росту;
- структура предоставления данных во всех формах различается: в БД РАиИ и форме № 18 РА классифицированы, при этом принципы классификации совпадают не полностью, в РГПТ какая-либо классификация РА отсутствует;
- в 4 регионах за период с 2010 по 2022 г. отсутствует информация о РА; из представивших информацию только в 6 регионах отмечается совпадение количества РА по всем источникам; выявлены отдельные регионы, которые предоставляют информацию в одни источники, но не предоставляют в другие; в 5 регионах выявлен размах более

чем в 50 случаев РА; в 53 субъектах РФ коэффициент вариации по количеству РА между источниками превысил 33%.

Выявленные различия свидетельствуют об отсутствии системного подхода к порядку предоставления сведений о РА. Отсутствие системности может быть связано с невыполнением в полной мере требований по предоставлению информации о РА в Центральный аппарат Роспотребнадзора и ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, отсутствием единообразия и унификации в представлении данных об РА, с противоречиями в перечне подлежащей предоставлению информации о РА в нормативно-правовых актах Роспотребнадзора^{11,12}, со сложностями в определении Управлениями Роспотребнадзора по субъектам РФ того, какая информация подлежит передаче в ту или иную форму статистического наблюдения.

Для практического устранения выявленных в ходе исследования расхождений, связанных с учетом РА и чрезвычайных ситуаций санитарно-эпидемиологического характера, связанных с нарушением правил обращения с ИИИ, предлагается:

- внести изменения в Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. № 11¹³ в части необходимости предоставления

¹¹ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. № 11 «О представлении внеочередных донесений о чрезвычайных ситуациях санитарно-эпидемиологического характера» [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 04.02.2016 No. 11 "On submission of reports on emergencies of sanitary and epidemiological nature". (In Russ.)]

¹² Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 23.12.2013 г. № 968 «О совершенствовании реагирования в случае возникновения радиационной аварии» [Order of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being of 23.12.2013 No. 968 "On Improving Response in the Event of a Radiation Accident". (In Russ.)]

¹³ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. № 11 «О представлении внеочередных донесений о чрезвычайных ситуациях санитарно-эпидемиологического характера» [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 04.02.2016 No. 11 "On submission of reports on emergencies of sanitary and epidemiological nature". (In Russ.)]

внеочередных донесений о всех чрезвычайных ситуациях санитарно-эпидемиологического характера, связанных с нарушением правил обращения с ИИИ, в БД РАИИ;

– при подготовке заключения на РГПТ проводить анализ структуры РА и полноты информации в соответствии с классификацией, представленной в п. 3.2 МР 2.6.1.0050-11¹⁴;

– рассмотреть возможность разработки отдельного блока по представлению сведений о РА от территориальных органов Роспотребнадзора в существующей Единой информационной автоматизированной системе (ЕИАС Роспотребнадзора).

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Громов А.В. – разработка дизайна исследования, обобщение и анализ информации из Базы данных по радиационным авариям и инцидентам, написание текста статьи, формирование окончательного варианта статьи и представление в редакцию журнала.

Ахматдинов Р.Р. – анализ данных, редактирование промежуточного варианта статьи, поиск публикаций по теме.

Библин А.М. – разработка дизайна исследования, обобщение и анализ данных радиационно-гигиенических паспортов территорий, представление соответствующих материалов в статью, систематизация и финальное редактирование статьи.

Тутельян О.Е. – определение материалов и методов исследования, сбор и анализ информации по форме федерального статистического наблюдения № 18, подготовка черновика рукописи, анализ литературы, промежуточное редактирование статьи.

Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам информационно-аналитического центра и лаборатории аварийного реагирования, принимавшим участие в формировании БД РАИИ.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

мизации радиационной защиты населения Российской Федерации».

Литература

1. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. Издание 2018 года. МАГАТЭ, Вена; 2023. 359 с.
2. IAEA. Nuclear Safety and Security Glossary. IAEA. Vienna; 2022. 246 p.
3. Симаков А.В., Клочков В.Н., Абрамов Ю.В. Обоснование предложений к новым нормам радиационной безопасности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68, № 4. С. 20–23. DOI: 10.33266/1024-6177-2023-68-4-20-23.
4. Рыжов С.А., Наркевич Б.Я., Водоватов А.В. К вопросу об интерпретации терминов «предел дозы» и «радиационная авария» при разработке новых норм радиационной безопасности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68, № 5. С. 38–43. DOI: 10.33266/1024-6177-2023-68-5-38-43.
5. Incident Reporting Systems for Nuclear Installations. URL: <https://www.iaea.org/resources/databases/irsni> (Дата обращения: 20.09.2023)
6. Ayoub A., Stankovski A., Kröger W., Sornette D. The ETH Zurich curated nuclear events database: Layout, event classification, and analysis of contributing factors // Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 213. P. 107781. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107781.
7. Романович И.К., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Анализ радиационных аварий и инцидентов, зарегистрированных в Российской Федерации за 2012–2016 годы. Материалы Всероссийской науч.- практ. конф. Актуальные вопросы организации контроля и надзора за физическими факторами. М., 2017. С. 343–346.
8. Czarwinski R., Häusler U. Übersicht über die besonderen Vorkommnisse mit ionisierender Strahlung in Deutschland (2005–2016) // StrahlenschutzPraxis. 2018. Vol. 24, № 2. P. 5–11.
9. Nuclear Material Events Database. Annual Report. Fiscal Year 2022. U.S. Nuclear Regulatory Commission; 2023. 79 p.
10. Australian Radiation Incident Register Report for Incidents in 2020. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency; 2021. 26 p.
11. Report on Lost or Stolen Sealed Sources and Radiation Devices. Canadian Nuclear Safety Commission; 2023. 15 p.
12. Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2022. STUK; 2022. 80 p.
13. Уйба В.В., Самойлов А.С., Соловьев В.Ю. и др. Оценка клинических проявлений у работников атомной промышленности, пострадавших в радиационных инцидентах на территории СССР с 1949 по 1991 гг. и Российской Федерации с 1992 по 2016 г. // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 4. С. 1–5.
14. Репин Л.В., Библин А.М., Ковалев П.Г. и др. Автоматизированная система контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора: история создания, назначение и развитие. Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 44–53.

Поступила: 23.10.2023 г.

¹⁴ 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. М.: ФБУЗ Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. 29 с. [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.)]

Громов Алексей Валерьевич – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией аварийного реагирования 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.gromov@niirg.ru

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

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

Тутельян Ольга Евгеньевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационного контроля и физических факторов отдела лабораторного дела Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Для цитирования: 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

Comparative analysis of information on radiation accidents in the Russian Federation in 2010–2022

Alexey V. Gromov¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹, Artem M. Biblin¹, Olga E. Tutelyan²

¹Saint-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

²Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

We have summarized, analyzed and assessed data on radiation accidents and incidents that occurred on the territory of the Russian Federation for the period from 2010 to 2022. The data are presented in the Data bank of radiation accidents and incidents of the Information and Analytical Center of Rospotrebnadzor on radiation safety, in the form of federal statistical observation No. 18 "Information on the sanitary condition of the subject of the Russian Federation", and in radiation-hygienic passports of territories. The objective of the study was to conduct a comparative analysis of information on radiation accidents for the period from 2010 to 2022 contained in the above-mentioned sources. The objective of the study was to perform a comparative analysis of information on radiation accidents for the period from 2010 to 2022 contained in the above-mentioned sources. Comparison of the number of radiation accidents in dynamics has shown the presence of discrepancies between the studied data sources, lack of systematicity of these discrepancies, and multidirectional trends in the number of radiation accidents. From 2010 to 2022, in the Data bank of radiation accidents and incidents of the Information and Analytical Center of Rospotrebnadzor on radiation safety were registered 2,690 cases of radiation accidents in 71 subjects of the Russian Federation, in Forms No. 18 – 2,469 cases in 67 subjects, in radiation-hygienic passports of territories – 2,457 cases in 76 subjects. Differences in the structure of data provision have been established: in the data bank and Form No. 18 radiation accidents are classified, but at the same time the principles of classification coincide partially; there is no classification in the radiation-hygienic passport of territories. The analysis showed that no information on radiation accidents was received from four regions during the study period. Among the subjects that provided information, only six regions have coincidence of data on all sources. Some regions were identified where information was provided to some data bases but not to others. In five regions, a range of more than 50 cases was detected; the coefficient of variation in the number of radiation accidents between sources exceeded 33% in 53 subjects. The identified discrepancies demonstrate the lack of a systematic approach to the procedure for providing information on

Alexey V. Gromov

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, St. Petersburg, Russia, 197101; E-mail: a.gromov@niirg.ru

radiation accidents, which may be related to the failure to fully comply with the requirements for providing information to Rospotrebnadzor and the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Prof. P.V. Ramzaev, contradictions in the list of information to be provided in Rospotrebnadzor's offices, and difficulties in determining by Rospotrebnadzor's offices in the subjects of the Russian Federation what information is to be reported in this or that form of statistical observation.

Key words: emergency reports, radiation accident, incident, radiation-hygienic passport of territories, federal statistical observation form No. 18.

Personal contribution of authors

Gromov A.V. – development of the study design, generalization and analysis of information from the Radiation Accidents and Incidents Database, writing the text of the article, forming the final version of the article and submission to the journal editorial board.

Akhmatdinov R.R. – data analysis, editing of the intermediate version of the article, search for publications on the topic.

Biblin A.M. – development of study design, generalization and analysis of data from radiation-hygienic passports of territories, presentation of relevant materials into an article, systematization and final editing of the article.

Tutelyan O.E. – selection of materials and methods of research, collection and analysis of information on the form of federal statistical observation № 18, preparation of draft manuscript, literature review, interim editing of the article.

Acknowledgments

The authors are grateful to the staff of the Information and Analysis Center and the Emergency Response Laboratory who participated in the formation of the Radiation accidents and incidents data bank of the Information and Analytical Center of Rospotrebnadzor data bank.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Funding

The study was not supported by sponsorship. The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025. “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological well-being, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Improvement of the system of measures and regulatory and methodological base to ensure emergency preparedness and response of Rospotrebnadzor bodies and organizations in the event of radiation accidents of various types in order to optimize radiation protection of the population of the Russian Federation”.

References

1. IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition. IAEA. Vienna; 2023. 359 p. (In Russian).
2. IAEA. Nuclear Safety and Security Glossary. IAEA. Vienna; 2022. 246 p.
3. Simakov AV, Klochkov VN, Abramov YuV. Radiation Safety Standards and Basic Health Rules for Radiation Safety: Proposal on the Development of New Versions. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2023;68(4): 20–23. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-4-20-23.
4. Ryzhov SA, Narkevich BYa, Vodovatov AV. To the Question of the Interpretation of the Terms “Dose Limit” and “Radiation Accident” in the Development of New Norms of Radiation Safety. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2023;68(5): 38–43. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-5-38-43.
5. Incident Reporting Systems for Nuclear Installations. Available on: <https://www.iaea.org/resources/databases/irsn> (Accessed: 20.09.2023).
6. Ayoub A., Stankovski A., Kröger W., Sornette D. The ETH Zurich curated nuclear events database: Layout, event classification, and analysis of contributing factors. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;213: 107781. DOI: 10.1016/j.res.2021.107781.
7. Romanovich IK, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Gromov AV, Repin LV. Analysis of the radiation accidents and incidents, registered in the Russian Federation on 2012–2016. Actual issues of the management of the control and surveillance on the physical factors. Moscow; 2017. P. 343–346. (In Russian).
8. Czarwinski R, Häusler U. Übersicht über die besonderen Vorkommnisse mit ionisierender Strahlung in Deutschland (2005–2016). *StrahlenschutzPraxis*. 2018;24(2): 5–11 (In German).
9. Nuclear Material Events Database. Annual Report. Fiscal Year 2022. U.S. Nuclear Regulatory Commission; 2023. 79 p.
10. Australian Radiation Incident Register Report for Incidents in 2020. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency; 2021. 26 p.
11. Report on Lost or Stolen Sealed Sources and Radiation Devices. Canadian Nuclear Safety Commission; 2023. 15 p.
12. Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2022. STUK; 2022. 80 p.
13. Uyba VV, Samoylov AS, Solovyev VYu, Bushmanov AYU, Ilyin LA. Evaluating clinical manifestations in nuclear power industry workers who suffered from radiation accidents in USSR in 1949–1991 and in Russian Federation in 1992–2016. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2017;(4): 1–5. (In Russian).
14. Repin L.V., Biblin A.M., Kovalev P.G., Nikolaevich M.S., Repin V.S. The automated system of radiation exposure control (ASCRe) for Rospotrebnadzor: creation history, applicability and development. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 44–53. (In Russian).

Received: October 23, 2023

For correspondence: Alexey V. Gromov – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Head of the Emergency Response 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 (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, Russia, 197101; E mail: a.gromov@niirg.ru)

Ruslan R. Akhmatdinov – Research engineer, 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 Well-Being, 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Olga E. Tutelyan – Candidate of Medical Sciences, Head of the Radiation Control and Physical Factors Laboratory, Federal Hygiene and Epidemiology Center, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

For citation: Gromov A.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Tutelyan O.E. Comparative analysis of information on radiation accidents in the Russian Federation in 2010–2022. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 122–133. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-122-133

Анализ возможностей оценки размеров охранных зон мирных ядерных взрывов на основе количественных закономерностей деформации земных недр

В.С. Репин¹, В.П. Рамзаев¹, А.М. Библин¹, К.В. Варфоломеева¹, С.А. Зеленцова¹, К.А. Седнев¹,
В.А. Ильичев², А.В. Касаткин², В.В. Касаткин²

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 Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии Государственной корпорации «Росатом», Москва, Россия

Отнесение территорий в местах проведения мирных ядерных взрывов к местам размещения особых радиоактивных отходов накладывает серьезные требования к прилегающей территории, ее границам, информированию населения, органов государственной власти и юридических лиц о запрете на ведение хозяйственной деятельности в пределах этих границ. В действующих Санитарных нормах и правилах СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» размеры границ охранных зон не определены. Целью данной работы является анализ литературных данных по структуре деформационных изменений недр при проведении мирных ядерных взрывов и обоснование количественных соотношений, на основе которых могут оцениваться размеры охранных зон. На основе сравнительного анализа литературных данных были выбраны количественные соотношения, позволившие рассчитать радиусы деформационных изменений (полость, зона дробления, зона трещиноватости и зона остаточных деформаций) в различных горных породах. Оценено, что максимальные значения радиусов зоны трещиноватости для мирных ядерных взрывов, проведенных на территории Российской Федерации в твердых породах, не превышают 200 м, а в пластичных породах – 250 м. Для определения границ охранных зон предложены упрощенные формулы, позволяющие дать консервативную оценку радиуса охранной зоны с учетом мощности и глубины взрыва.

Ключевые слова: охранный зона, мирные ядерные взрывы, подземные ядерные взрывы, особые радиоактивные отходы, горные породы, полость взрыва, трещиноватость, зона дробления, зона разрушения.

Введение

Отнесение территорий в местах проведения мирных ядерных взрывов (МЯВ) к местам размещения особых радиоактивных отходов (ОРАО)^{1,2} предопределило необходимость длительного наблюдения за данными объектами, поскольку жизненный цикл существования ОРАО

исчисляется тысячами лет из-за наличия в зоне взрыва долгоживущих радионуклидов, а их извлечение из зоны взрыва с целью окончательного захоронения не предусматривается в силу их «особого» статуса, связанного с технической сложностью, экономической и радиационной нецелесообразностью процесса извлечения.

¹ Федеральный закон от 11.07.2011 г. №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 октября 2012 г. № 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.)]

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

Можно выделить несколько основных источников потенциальной опасности ОРАО, находящихся в зоне взрыва: вынос радионуклидов в водоносные горизонты и на поверхность, несанкционированное бурение в охранный зоне (ОЗ) и несанкционированное ведение хозяйственной деятельности на территории ОЗ.

Несанкционированная деятельность на территории ОЗ может привести к повреждению технологических (зарядных), контрольных, приборных скважин и стимулированию выноса долгоживущих радионуклидов в верхние горизонты, поэтому определение размеров ОЗ, то есть границ, за пределами которых хозяйственная деятельность может осуществляться без развития неблагоприятных сценариев, имеет принципиальное значение.

Действующие санитарные правила³ предусматривают создание охранных зон в местах проведения МЯВ, но размеры этих зон в данном документе не приводятся.

В соответствии с федеральными нормами и правилами⁴ границы объекта МЯВ должны устанавливаться с учетом размеров зон механического действия взрыва и других критериев.

Из результатов исследований, представленных в целом ряде работ, следует, что на территориях в ряде мест проведения взрывов границы ОЗ не обозначены, некоторые территории захламлены остатками технологического оборудования и металлоконструкциями, на них имеются следы хозяйственной деятельности [1–6].

Цель исследования – анализ литературных данных по методам количественной оценки деформационных изменений земных недр при проведении мирного ядерного взрыва и обоснование количественных соотношений, на основе которых могут оцениваться размеры охранных зон.

Методические подходы

В научной литературе приводятся различные методы оценки размеров деформационных изменений горных пород при проведении МЯВ. Типичная структура центральной зоны камуфлетного ядерного взрыва представлена на рисунке 1 [7, 8].

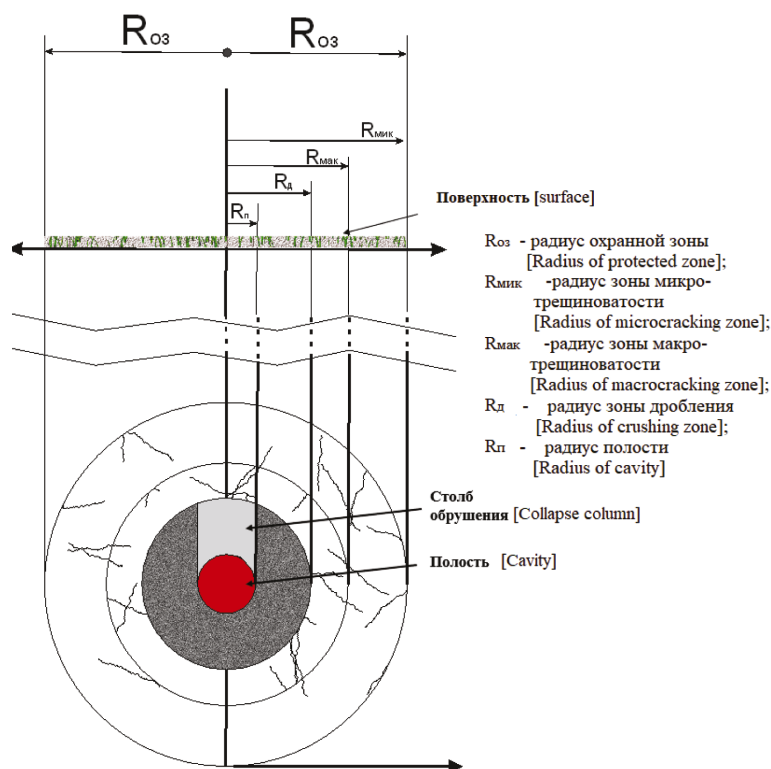


Рис. 1. Проекция зоны мирного ядерного взрыва на поверхность Земли
[Fig. 1. Projection of the zone of a peaceful nuclear explosion on the Earth's surface]

³ СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 годы) ядерных взрывов в мирных целях» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2819-10 «Ensuring radiation safety of the population living in areas where nuclear explosions for peaceful purposes were conducted (1965–1988)» (In Russ.)]

⁴ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» (НП-103-17), утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 октября 2017 г. № 418. Зарегистрировано в Минюсте России 2 ноября 2017 г. № 48779 [Federal norms and rules in the field of atomic energy use "Requirements for ensuring the safety of special radioactive waste disposal sites and special radioactive waste conservation sites" (NP-103-17), approved by order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated October 10, 2017 No. 418. Registered by the Ministry of Justice of Russia on November 2, 2017 No. 48779. (In Russ.)]

Структурными элементами этой зоны являются полость со столбом обрушения радиусом R_n , зона дробления – R_d и зона трещиноватости в форме макротрещин – $R_{\text{мак}}$ и микротрещин – $R_{\text{мик}}$. Макро- и микротрещины способствуют переносу радионуклидов из полости к периферии, а несанкционированное бурение скважин в зоне микротрещин способствует ускорению переноса радионуклидов, вышедших за пределы полости, в водоносные горизонты. Таким образом, радиус охранной зоны мирного ядерного взрыва должен быть не менее радиуса распространения микротрещин.

Для описания деформирующих свойств грунта при взрыве используются различные модели грунтовых сред и выделяют 3 основных их вида: скальные, полускальные и мягкие. К скальным относятся гранитоиды, диориты и пр., к полускальным – песчаники, известняки и др., к мягким – глины, суглинки и пр. [9].

В научной литературе приводятся различные соотношения, позволяющие оценить размеры деформационных изменений после проведения взрыва. В основу большинства расчетов для камуфлетных взрывов из теории подобия положена линейная зависимость радиуса деформации от кубического корня мощности взрыва, выраженного в килотоннах тринитротолуола [7–11]. Например, для взрывов, произведенных в штольнях Семипалатинского полигона, предложено соотношение (1) [9]:

$$R_{\text{пв}} = (8,5 - 10) \cdot E^{1/3}, \quad (1)$$

где:

$R_{\text{пв}}$ – радиус полости взрыва, м;

E – мощность взрыва, кт;

8,5–10 – диапазон возможных значений коэффициентов, м/кт.

В аналогичном соотношении (2), приведенном в статье Boardman [12], радиус, выраженный в футах, рассчитывается через коэффициенты, принятые отдельно для каждого типа породы (табл. 1):

$$R_{\text{пв}} = C \cdot E^{1/3}, \quad (2)$$

где:

$R_{\text{пв}}$ – радиус полости, взрыва, футы;

E – мощность взрыва, кт;

C – коэффициент, фут/кт^{1/3}.

В ряде публикаций расчет радиуса полости взрыва рассчитывается с учетом физических свойств горных пород [7, 11–13]. В монографии В.Н. Архипова и др. [7]

поясняется, что «полость взрыва формируется в результате воздействия на грунтовую среду продуктов взрыва (в основном испаренного грунта), ударной волны и волны сжатия. Максимальное значение радиуса полости взрыва зависит от свойств грунта, энергии взрыва и глубины заложения заряда». Для расчета радиуса предложено эмпирическое выражение (3):

$$R_{\text{пв}} = \frac{K \cdot E^{1/3}}{(\rho \cdot H \cdot 10^{-3})^\alpha}, \quad (3)$$

где:

$R_{\text{пв}}$ – радиус полости взрыва, м;

E – мощность взрыва, кт;

ρ – средняя плотность грунтовой среды, г/см³;

H – глубина заложения заряда, м;

α – показатель, зависящий от эффективной массовой влажности грунтовой среды вблизи центра взрыва и изменяющийся в пределах 0,27–0,32;

K – коэффициент, характеризующий влажность среды и равный примерно 5 для влажного грунта и примерно 10 для скальной породы.

Разновидностью формулы (3) является формула (4), приведенная в [11]:

$$R_{\text{пв}} = \frac{C \cdot E^{1/3}}{(\rho \cdot H)^\alpha}, \quad (4)$$

где:

коэффициент C принимается равным 580 – для сланцев, 509 – для гранитов, фут/кт^{1/3};

α – показатель, равный 0,324 для плотных силикатных пород, плотностью 2,7–2,8 г/см³;

E – мощность взрыва, кт;

ρ – плотность породы, г/см³;

H – глубина заложения заряда, футы.

Универсальное эмпирическое соотношение (5) оценки радиуса полости взрыва в твердых породах (гранит, туф, доломит, каменная соль, аллювий) с учетом плотности породы, мощности взрыва, глубины заложения заряда, прочности породы на сжатие и на сдвиг предложено в статье [14]:

$$r_{\text{cv}} = 21 \cdot W^{0,306} \cdot E^{0,514} \cdot \rho^{-0,244} \cdot \mu^{-0,576} \cdot h^{-0,161}, \quad (5)$$

где r_{cv} – радиус полости взрыва, м;

W – мощность взрыва, кт;

E – модуль Юнга, мегабар;

ρ – плотность породы, г/см³;

μ – модуль сдвига, мегабар;

h – глубина заложения заряда, м.

Значения коэффициента C , принятые для некоторых видов горных пород для расчета радиуса полости взрыва по формуле (2) [12]

Таблица 1

[Table 1]

The coefficient C values accepted for certain types of rocks for the calculation of the radius of the explosion cavity by formula (2) [12]

Тип породы [Rocks kind]	Мощность взрыва, кт [Explosive power, kt]	Глубина, фут [Depth, ft]	C , фут/кт ^{1/3} [C , ft/kt ^{1/3}]	$R_{\text{пв}}$, фут [Radius of cavity, ft]	C , м/кт ^{1/3} [C , m/kt ^{1/3}]
Граниты [Granits]	61	1520	37,2	146	11,3
Песчаники [Sandrocks]	26	4240	28,6	85	8,7
Доломит [Dolomite]	12	1320	29,6	68	9,0
Каменная соль [Rock salt]	3,4	1184	40,5	90	12,3

Данное соотношение было верифицировано на 46 взрывах и позволяет, как показано в статье [14], рассчитывать радиус полости со средней неопределенностью 7,8%.

Из всего многообразия МЯВ взрывы, проведенные в каменной соли, выделены в отдельную группу. Особенности этих взрывов являются высокая пластичность породы, большой объем полости и устойчивость ее к обрушению [8, 15, 16]. Эти свойства позволили создать большие подземные полости различного назначения.

Для оценки радиуса полости в каменной соли в публикации [8] предложена формула (6), включающая, кроме мощности взрыва, глубину заложения заряда и плотность породы:

$$R_{пв} = \frac{66,3E^{1/3}}{(\rho \cdot H)^{1/4}} \quad (6)$$

где:

$R_{пв}$ – радиус полости взрыва, м;

E – мощность взрыва, кт;

H – глубина заложения заряда, м;

ρ – плотность породы, принятая для каменной соли равной 2,173 кг/дм³.

Для оценки конечного радиуса полости взрыва в работе Васильева А.П. и др. [8] приведена также формула (7):

$$R_{пв} = E^{1/3} \left(1 - \frac{H}{H_0}\right) \quad (7)$$

где:

$R_{пв}$ – радиус полости взрыва, м;

E – мощность взрыва, кт;

H – глубина заложения заряда, м;

H_0 – константа, равная 2800 м.

Радиус полости взрыва, как правило, является от-правным показателем при оценке радиуса зон дробления, трещиноватости, смятия и остаточных деформаций (табл. 2) [7].

Из таблицы 2 видно, что за пределами полости взрыва деформационные изменения достигают 7-кратных значений по отношению к радиусу полости взрыва.

В работах АО «ВНИПИпромтехнологии» рассматривается и другой подход. При разработке проектов реабилитации территорий и таких локальных нормативных актов, как «Технологический регламент обеспечения радиационной безопасности», «Обоснование безопасности эксплуатации объекта МЯВ» и др., для оценки размеров «охранной зоны» принята следующая концепция оценки потенциально возможного влияния техногенных радионуклидов на загрязнение земной поверхности и зоны активного водообмена [17–23]:

– при отсутствии горногеологических условий миграции техногенных радионуклидов в вышележащие горизонты⁵ размер ОЗ принимается равным проекции зоны дробления;

– при потенциальной возможности выхода техногенных радионуклидов, в том числе по заколонному пространству технологической (зарядной) скважины рассчитывается радиус возможного распространения радионуклидов в водоносных горизонтах, и размер охранной зоны определяется с учётом как радиуса зоны дробления, так и зоны распространения (миграции) техногенных радионуклидов;

– при наличии на земной поверхности пунктов хранения отходов, содержащих повышенное количество техногенных радионуклидов, и/или устьев скважин в зоне взрыва, размер ОЗ увеличивается за счет участков территории этих объектов.

В статье Ю.В. Дубасова [24] оценка размеров зоны трещиноватости выполнена по формуле, в которой ради-

Таблица 2

Размер зон разрушения камуфлетным ядерным взрывом [7]

[Table 2]

Size of the destruction zones due to a camouflage nuclear explosion [7]

Грунт [Ground]	Зоны разрушения [Zones of destruction]	Радиус зоны, м [Radius of zone, m]
Скальная порода [Rock formation]	Зона дробления [Crushing zone]	$(1,5-2,5) \times R_{пв}$ [Radius of cavity]
	Зона интенсивной трещиноватости [Zone of intense fracturing]	$(3-5) \times R_{пв}$ [Radius of cavity]
	Зона масштабирования естественных трещин [Scaling zone of natural cracks]	$(5-7) \times R_{пв}$ [Radius of cavity]
Мягкий грунт [Soft ground]	Зона смятия (дробление твердых зерен, потеря сцепления, трещинообразование) [Buckling zone (crushing of hard grains, loss of adhesion, cracking)]	$\sim 3 \times R_{пв}$ [Radius of cavity]
	Зона остаточных деформаций [Residual deformation zone]	$\sim 5 \times R_{пв}$ [Radius of cavity]

⁵ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» (НП-103-17, п.п. 49, 54), утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 октября 2017 г. № 418. Зарегистрировано в Минюсте России 2 ноября 2017 г. № 48779 [Federal norms and rules in the field of atomic energy use "Requirements for ensuring the safety of special radioactive waste disposal sites and special radioactive waste conservation sites" (NP-103-17, paragraphs 49,54), approved by order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated October 10, 2017 No. 418. Registered by the Ministry of Justice of Russia on November 2, 2017 No. 48779. (In Russ.)]

ус зоны микротрещин консервативно оценен коэффициентом пропорциональности 70–100 м/кТ^{1/3}.

В материалах, представленных в работе Васильева А.П. и др. [8], размер полости взрыва $R_{пв}$, зоны дробления – $R_{др}$ и зоны микротрещиноватости – $R_{мик}$ выражены также упрощенным образом (8) через мощность взрыва, выраженную в килотоннах (кТ):

$$\begin{aligned} R_{пв} &= (6 \div 8) \text{ м/кТ}^{1/3}, \\ R_{др} &= (25 \div 35) \text{ м/кТ}^{1/3} \\ R_{мик} &= (70 \div 90) \text{ м/кТ}^{1/3} \end{aligned} \quad (8)$$

В книге В.В. Адушкина и др. [10] размер радиуса зоны трещиноватости в штольнях Семипалатинского полигона выражен через размер полости взрыва с коэффициентом, близким к 5,5, а радиус полости – величиной 8–10 м/кТ^{1/3}, то есть радиус зоны микротрещин, выраженный через произведение указанных коэффициентов, может быть порядка 44–55 м/кТ^{1/3}.

Более точные эмпирические соотношения, позволяющие оценивать радиусы зон дробления и трещиноватости с учетом физических свойств пород, приведены в монографиях [9, 10].

Радиус зоны дробления определяется через радиус полости взрыва посредством формулы (9):

$$R_{др} = R_{пв} \left(\frac{\rho \cdot C_p^2}{4 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1/3} \quad (9)$$

где:

$R_{др}$ – радиус зоны дробления, м;

$R_{пв}$ – радиус полости взрыва, м;

ρ – плотность породы, г/см³;

C_p – скорость звука, м/с;

$\sigma_{сж}$ – прочность породы на сжатие, Па.

В свою очередь, радиус зоны трещиноватости определяется через радиус зоны дробления следующим образом (10):

$$R_{тр} = R_{др} \left(\frac{\sigma_{сж}}{2(\sigma_{раст} + \rho g H)} \right)^{1/2} \quad (10)$$

где:

$R_{тр}$ – радиус зоны трещиноватости, м;

$R_{др}$ – радиус зоны дробления, м;

$\sigma_{сж}$ – прочность породы на сжатие, Па;

$\sigma_{раст}$ – прочность породы на растяжение, Па;

ρ – плотность породы, г/см³;

H – глубина заложения заряда, м;

g – ускорение свободного падения 9,8 м/с².

Из формул (9) и (10) видно, что радиус зоны трещиноватости растет с увеличением мощности заряда, плотности породы и с уменьшением глубины заложения заряда, прочности на сжатие и прочности на растяжение.

Результаты и обсуждение

На основе анализа литературных данных и приведенных выше соотношений и формул представляется возможным сравнить оценки деформационных изменений в горных породах после проведения мирного ядерного взрыва и выбрать наиболее приемлемую формулу, на основе которой можно будет рассчитывать радиус охраняемых зон.

Общее представление о видах пород, диапазонах мощностей взрывов, количестве взрывов и глубинах заложения зарядов дает таблица 3 [8].

Данные таблицы 3 показывают, что наибольшее количество взрывов произведено в пластах каменной соли, глинах, песчаниках и известняках. Наиболее мощные взрывы выполнены в карбонатных, доломитных, аргиллитных и алевролитных породах.

На рисунке 2 показано распределение количества взрывов по мощности и по глубине заложения заряда. Из рисунка 2 видно, что около 70% взрывов произведе-

Таблица 3

Обобщение данных по количеству мирных ядерных взрывов, их мощности и глубине заложения зарядов, проведенных в РФ в различных видах горных пород [8]

[Table 3]

Summary of data on the number of peaceful nuclear explosions, their yield and depth of emplacement of charges detonated in different types of rocks in the Russian Federation [8]]

№ п/п	Виды и группы горных пород* [Types and groups of rocks*]	Количество произведенных взрывов, шт. [Number of explosions]	Диапазон мощностей взрывов, кТ [Explosive power range, kt]	Диапазон глубин, м [Depth range, m]
1	Граниты [Granites]	2	8,5–10	499–557
2	Каменная соль [Rock salt]	33	2,3–15	160–1 491
3	Алевролиты [Aleurolite]	4	6,3–15	640–886
4	Аргиллиты [Argyllites]	4	2,5–19	130–2851
5	Глины [Clay]	11	0,3–37,6	172–1511
6	Доломиты [Dolomites]	5	2,3–15	577–2123
7	Известняки [Limestones]	12	1,7–7,6	98–2075
8	Карбонаты [Carbonate]	6	15	1515–1541
9	Мергели [Marls]	2	7,6–8,5	537–982
10	Песчаники [Sandrocks]	8	0,3–7,6	395–959

* в перечень вошли только основные виды (в основном осадочных) горных пород

[* only common types of rocks (mostly sedimentary rocks) are listed].

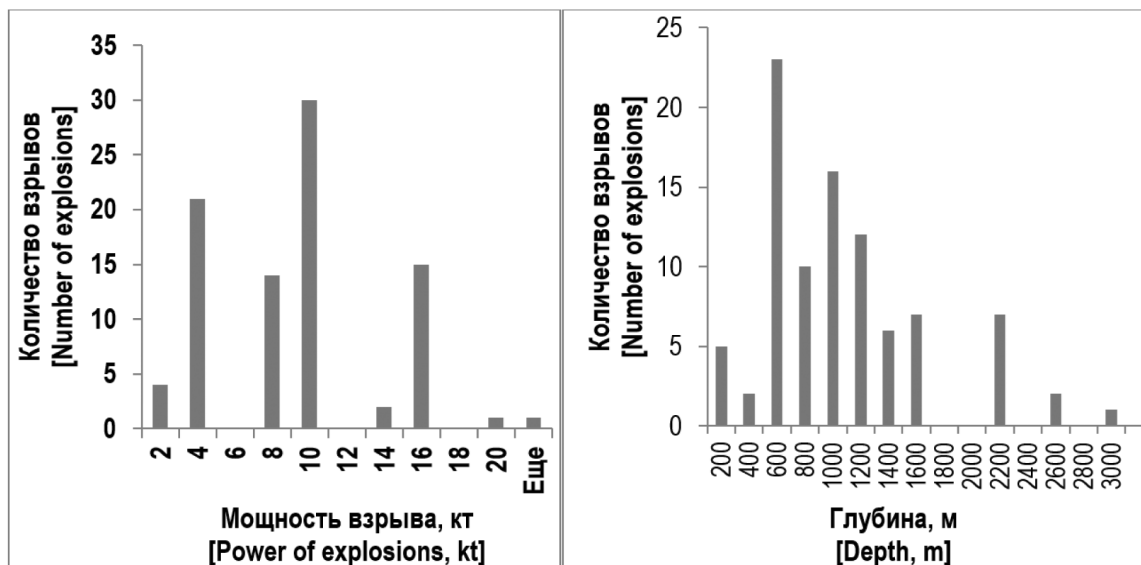


Рис. 2. Распределения количества взрывов по мощности (слева) и по глубине (справа)
[Fig. 2. Distributions of the number of explosions by power (left) and by depth (right)]

ны с мощностью до 10 кт (слева), а преобладающее число взрывов (справа) произведено на глубинах от 500 до 1600 м.

Поскольку радиус полости взрыва является отправным показателем при определении радиусов зон дробления и трещиноватости (смятия), то важным было сравнить между собой варианты расчета и выбрать из них наиболее консервативный, но не дающий существенной переоценки по сравнению с другими вариантами расчета. Расчеты выполнены для мощности взрыва 10 кт и для 2 глубин заложения заряда 500 и 1500 м и для 5 типов

пород с различающимися значениями физических характеристик: прочность на сжатие, модуль Юнга, прочность на растяжение, прочность на сдвиг, плотность.

Справочные данные о физических свойствах горных пород характеризуются большим разнообразием для каждого показателя [25–29], поэтому в таблице 4 приведены значения, сочетание которых позволяет получать более высокие значения радиусов. Исключение составляет прочность на сдвиг, величина которого связана с модулем Юнга U через соотношение (11) [25]:

Физические характеристики горных пород, принятые для расчета⁶

Таблица 4

Physical characteristics of rock groups used for calculation⁶

[Table 4]

Горная порода [Groups of rocks]	Прочность на сжатие ¹⁾ , МПа [Compressive strength, MPa]	Модуль Юнга ²⁾ , МПа [The Young's modulus, MPa]	Прочность на растяжение ¹⁾ МПа [Tensile strength, MPa]	Прочность на сдвиг ³⁾ , МПа [Flexural strength (MPa)]	Плотность ⁴⁾ , г/см [Density, g/cm ³]
Граниты [Granits]	165	70	15	29	2,4
Песчаники [Sandrocks]	115	60	11	21	1,6
Известняки [Limestones]	62	30	6	14	1,7
Каменная соль [Rock salt]	29	20	2	7,7	2,1
Глины [Clay]	7	15	0,5	7,5	1,7

¹⁾ для расчета использованы средние значения [the mean values are used for calculation];

²⁾ приняты значения, близкие к максимальным [the values near maximum were taken into account];

³⁾ рассчитано через модуль Юнга и коэффициент Паскаля [calculated through the Young's modulus and the Pascal's coefficient];

⁴⁾ приняты значения, близкие к минимальным [the values near minimum were taken].

⁶ Плотность породы, прочность на сжатие, прочность на разрыв и модуль Юнга, представленные в таблице, выбраны из широкого набора справочных данных [25–29], а значения определены таким образом, чтобы результаты расчета радиусов принимали по возможности максимальные значения [The rock density, compressive strength, tensile strength, and Young's modulus presented in the table are selected from a wide range of reference data [25–29], and the values are determined in such a way that the results of radii calculations take the maximum possible values].

$$G = \frac{U}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (11)$$

где:

G – прочность на сдвиг, МПа;

U – модуль Юнга, МПа;

ν – коэффициент Пуассона.

Средние значения коэффициентов Пуассона, по данным [25, 28], равны 0,2; 0,1; 0,4; 0,3; 0 для гранита, песчаника, известняка, каменной соли и глины соответственно.

Физические характеристики пород, на основе которых выполнены расчеты, приведены в таблице 4.

Результаты расчета радиуса полости с использованием разных формул для параметров, приведенных в таблице 4, даны в таблице 5.

Из результатов, приведенных в таблице 5, видно, что наибольшие значения радиусов получены с использованием соотношения (2) и (5), но при расчете по формуле (2) расчетные значения не зависят от глубины, поэтому их дальнейшее использование нецелесообразно.

Соотношение (3) дает близкие, но несколько меньшие значения. Для каменной соли и глины значения, рассчитанные по формуле (6), близки к значениям, рассчитанным по формуле (5). Таким образом, выражение (5) является универсальным вариантом консервативного расчета радиуса полости на различных глубинах и для пород с различными физическими характеристиками. Более наглядное представление различий в расчетах изменений радиусов от глубины взрыва по формулам (3) и (5) для твердых пород (гранит, песчаник, известняк) и пластичных пород (каменная соль и глина) дают графики на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что расчеты по формуле (5) дают более высокие значения, чем по формуле (3) для всех перечисленных на рисунке горных пород, что дополнительно подтверждает целесообразность использования формулы (5) для консервативной оценки радиуса полости.

Используя результаты расчета радиуса полости взрыва по формуле (5), можно рассчитать радиусы зон трещиноватости для твердых пород и радиусов зон остаточ-

Таблица 5

Результаты расчета радиуса полости в зависимости от используемой формулы расчета, м

[Table 5]

Results of calculating the radius of the cavity depending on the calculation formula used, m]

Номер формулы, ссылка на литературный источник [Formula number, reference]	Радиус полости взрыва, м (числитель для глубины 500 м, знаменатель – 1500 м) [Radius of the explosion cavity, m (numerator is for the depth of 500 m, denominator is for the depth of 1500 m)]				
	Граниты [Granits]	Песчаники [Sandrocks]	Известняки [Limestones]	Каменная соль [Rock salt]	Глины [Clay]
(1), [9]	21,5/21,5	21,5/21,5	21,5/21,5	21,5/21,5	21,5/21,5
(2), [12]	24,3/24,3	18,7/18,7	–	26,5/26,5	–
(3), [7]	20,6/15,6	22,8/17,3	22,4/17,0	26,5/16,2	24,4/17,0
(5), [14]	22,7/19,3	27,9/23,7	24,4/20,6	26,5/22,4	24,4/20,7
(6), [8]	–	–	–	25,1/19,1	26,4/20,1

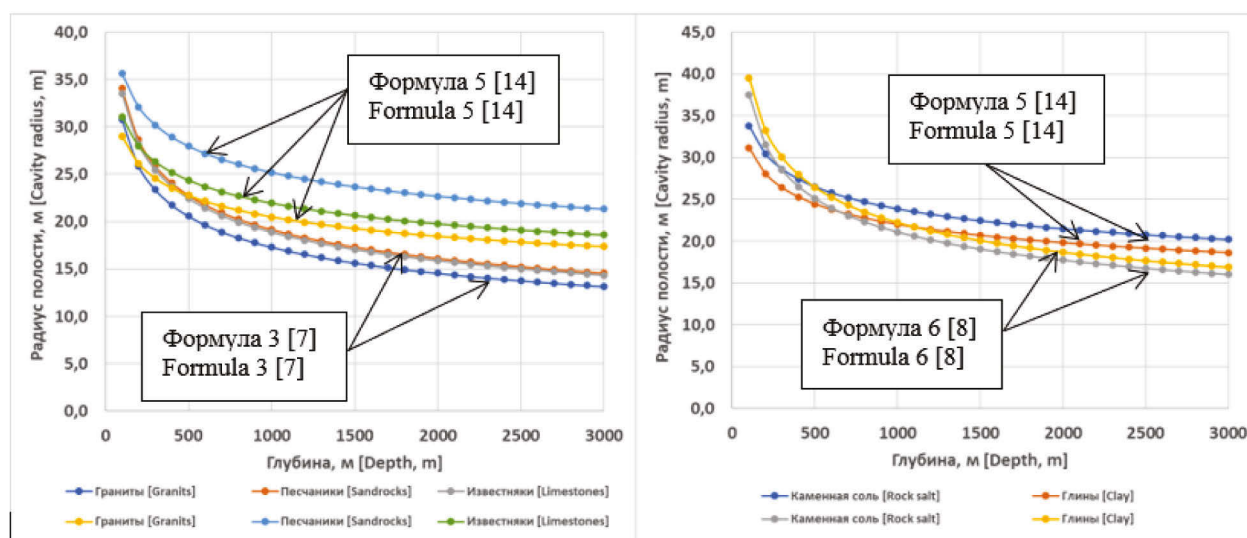


Рис. 3. Зависимость радиуса полости от глубины для различных вариантов расчета: слева – гранит, песчаник, известняк; справа – каменная соль, глина

[Fig. 3. Dependence of the cavity radius on depth for various calculation options: on the left – granite, sandstone, limestone; right – rock salt, clay]

ной деформации для пластичных пород – каменной соли и глины.

Расчеты для твердых пород (12) выполнены с использованием формул (5), (9), (10). Обобщенная формула имеет следующий вид:

$$R_{tr} = 21 \cdot W^{0,306} \cdot E^{0,514} \cdot \rho^{-0,244} \cdot \mu^{-0,576} \cdot h^{-0,161} \cdot \left(\frac{\rho \cdot C_p^2}{4 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\sigma_{сж}}{2(\sigma_{раст} + \rho g H)} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

где все обозначения соответствуют обозначениям, приведенным в формулах (5), (9), (10).

Расчеты для пластичных пород выполнены с использованием формулы (5), а оценка размеров зон остаточной деформации R_{def} выполнена путем умножения радиуса полости на коэффициент, приведенный в таблице 2. Величина этого коэффициента для мягкого грунта равна 5, однако в настоящей работе расчеты по формуле (13) выполнены с использованием коэффициента 7 – максимального коэффициента трещинообразования для скальных пород, что дает дополнительный запас консервативности:

$$R_{def} = 7 \cdot 21 \cdot W^{0,306} \cdot E^{0,514} \cdot \rho^{-0,244} \cdot \mu^{-0,576} \cdot h^{-0,161}, \quad (13)$$

Результаты расчета радиусов максимальных деформаций в зависимости от глубины заложения заряда для мощности взрыва 10 кт приведены на рисунке 4. Из рисунка 4 видно, что с увеличением глубины кривые для твердых и пластичных горных пород расходятся все сильнее, достигая практически двукратных различий на глубинах более 2000 м. Максимальные значения радиусов

в группе твердых пород относятся к песчаникам, а в группе пластичных пород – к каменной соли. Таким образом, формула (12) для песчаников и формула (13) для каменной соли могут быть предложены в качестве единых универсальных выражений при оценке радиуса максимальных деформаций для соответствующих групп горных пород. Применение этих соотношений для расчетов позволит избежать недооценки радиусов для всех остальных пород, входящих в указанные группы.

Горизонтальная линия, показанная на рисунке 4, – результат расчета радиуса микротрещин с помощью упрощенного соотношения (8) для мощности взрыва 10 кт: $R_{tr} = 90 \cdot 10^{1/3} = 194$ м. Из рисунка 4 видно, что упрощенный вариант расчета дает близкие значения только для глубины взрыва от 200 до 400 м. Для всех остальных значений глубин упрощенный вариант расчета завышает радиусы, рассчитанные по формулам (12) и (13).

Представляет интерес применить формулы (12) и (13) для всех взрывов, произведенных на территории РФ, исключая экскавационные, аварийные и штольневые взрывы в горном массиве, поскольку охранные зоны для этих взрывов определяются по другим критериям. Важно отметить, что все оценки по указанным формулам расцениваются как консервативные, то есть фактические размеры деформационных изменений могут быть меньше.

В таблице 6 даны оценки минимальных и максимальных радиусов трещиноватости для твердых пород и радиусов остаточной деформации для пластичных пород.

Из таблицы 6 видно, что расчеты по формуле (8) завышают размеры деформаций, причем, как видно из рисунка 4, степень завышения тем больше, чем больше глубина взрыва. Сопоставляя отношения радиусов, полученных

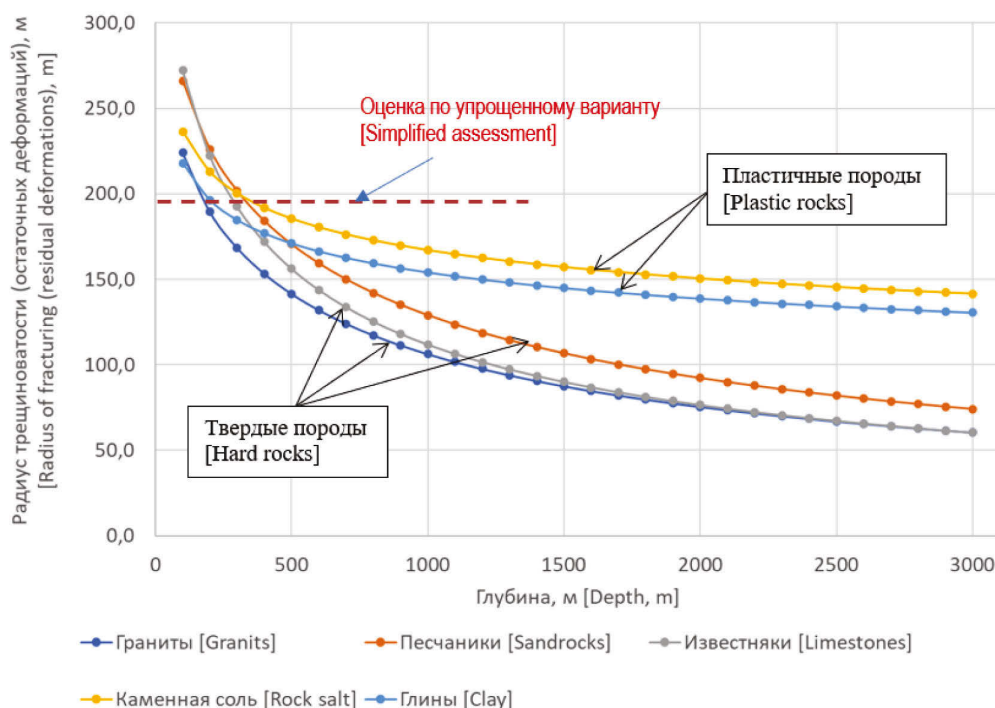


Рис. 4. Зависимость радиуса зоны трещиноватости от глубины заложения заряда в различных горных породах для мощности взрыва 10 кт

[Fig. 4. Dependence of the fracture zone radius on the depth of the charge embedment in different rocks for the 10 kt explosion]

Таблица 6

Результаты оценки минимальных и максимальных радиусов деформаций в зонах проведения камуфлетных мирных ядерных взрывов с использованием различных формул

[Table 6]

Results of assessing the minimum and maximum radii of deformation in the zones of camouflage peaceful nuclear explosions using various formulas

Тип породы [Rock type]	Вариант расчета [Calculation formula]	Минимальный радиус, м [Minimum radius, m]	Максимальный радиус, м [Maximum radius, m]
Твердые породы [Hard rocks]	Формула (13) [Formula (13)]	50	184
	Формула (9) [Formula (9)]	119	240
Пластичные породы [Plastic rocks]	Формула (14) [Formula (14)]	33	235
	Формула (9) [Formula (9)]	60	301

для каждого взрыва с использованием формул (12) и (8) и (13) и (8), можно рассчитать зависимость поправочного коэффициента от глубины взрыва. Графики зависимостей для твердых и пластичных пород представлены на рисунке 5.

С учетом представленных на графике уравнений (см. рис. 5), описывающих зависимость поправочного коэффициента от глубины взрыва, можно предложить для практического использования упрощенный вариант консервативной оценки радиуса деформаций с учетом мощности и глубины взрыва.

Для твердых пород:

$$R_{TP} = 1300 \cdot E^{1/3} \cdot H^{-0.45} \quad (14)$$

Для пластичных пород:

$$R_{def} = 310 \cdot E^{1/3} \cdot H^{-0.2} \quad (15)$$

где:

R_{TP} – радиус зоны трещиноватости, м.;

R_{def} – радиус зоны деформации, м;

E – мощность взрыва, кт;

H – глубина взрыва, м.

Более точные оценки радиусов деформаций могут быть выполнены с помощью формул (12) и (13), где, кро-

ме глубины и мощности взрыва, учитываются физические параметры горных пород, в которых произведены взрывы.

Выводы

1. Выполнен анализ литературных данных по методам расчета радиуса полости МЯВ для различных видов горных пород и размеров деформационных изменений в породах, находящихся за пределами полости, в виде зон дробления, трещиноватости, смятия, остаточных деформаций.

2. В результате сравнительного анализа количественных подходов, позволяющих рассчитать радиус полости МЯВ, выбрано соотношение, которое позволяет дать умеренно консервативную оценку радиусов с учетом широкого набора параметров. На основе выбранного соотношения предложены формулы для расчета максимальных размеров деформаций за пределами полости.

3. Показано, что максимальные рассчитанные значения радиусов деформаций для МЯВ, произведенных на территории РФ в твердых породах, не превышают 200 м, а в пластичных породах – 250 м.

4. Для определения границ охранных зон предложены упрощенные формулы, позволяющие дать консерва-

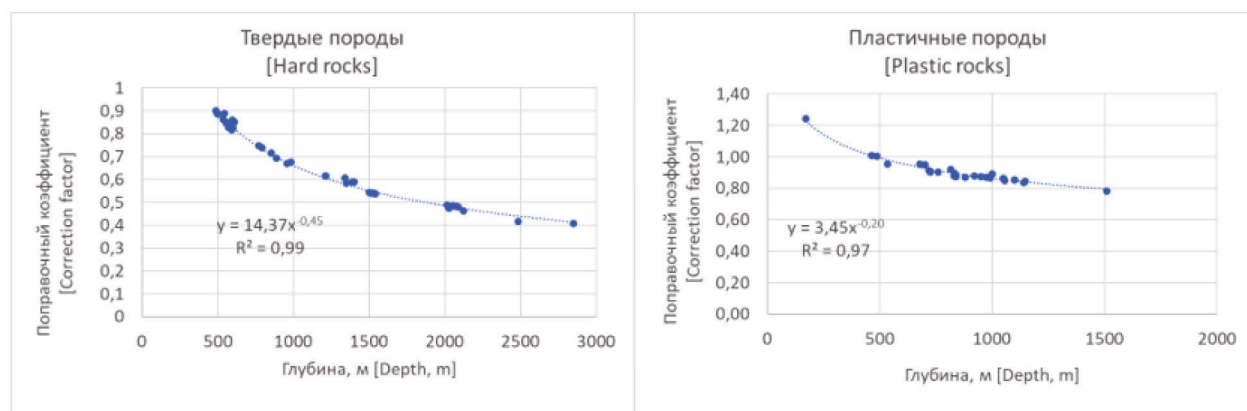


Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента от глубины взрыва при использовании упрощенного варианта оценки радиуса деформаций: слева для твердых пород; справа для пластичных пород

[Fig. 5. Dependence of the correction factor on the depth of the explosion when using a simplified version of estimating the radius of deformation. Hard rocks to the left. Plastic rocks to the right]

тивную оценку радиуса ОЗ с учетом мощности и глубины взрыва:

для твердых пород:

$$R_{тр} = 1300 \cdot E^{1/3} \cdot H^{0.45}$$

для пластичных пород:

$$R_{def} = 310 \cdot E^{1/3} \cdot H^{0.2}$$

где:

$R_{тр}$ – радиус зоны трещиноватости, м.;

R_{def} – радиус зоны деформации, м;

E – мощность взрыва, кт;

H – глубина взрыва, м.

Размеры охранных зон могут изменяться в большую сторону при наличии на территории, прилегающей к месту проведения мирного ядерного взрыва, мест захоронения радиоактивного грунта и скважин различного назначения.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин В.С. – разработка концепции исследования, руководство выполнением исследования, написание и редактирование промежуточных вариантов и окончательного текста статьи.

Рамзаев В.П. – редактирование и окончательное оформление статьи.

Библин А.М. – сбор и систематизация литературных данных, редактирование промежуточного варианта статьи.

Варфоломеева К.В. – поиск и анализ литературных данных, редактирование промежуточного варианта статьи для публикации.

Зеленцова С. А. – поиск и анализ литературных источников данных, сбор и систематизация материалов исследования, содержательное редактирование текста статьи.

Седнев К.А. – сбор литературных данных, редактирование промежуточного варианта текста статьи.

Ильичев В.А. – экспертная оценка литературных источников, научное редактирование отдельных частей статьи.

Касаткин А.В. – обобщение собственных и литературных данных, редактирование и окончательное оформление статьи.

Касаткин В.В. – сбор и анализ литературных источников, организация работы авторов АО «ВНИПИпромтехнологии», координация написания статьи, редактирование статьи для публикации.

Информация о конфликте интересов

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

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

1. Библин А.М., Храмцов 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.
2. 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.
3. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 27–33.
4. Рамзаев В.П., Травникова И.Г., Басалаева Л.Н. и др. 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.
5. 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. 2011. Vol. 102, № 7. P. 672–80. DOI:10.1016/j.jenvrad.2011.04.003.
6. Храмцов Е.В., Репин В.С., Библин А.М. и др. Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 111–123. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123.
7. Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М. и др. Механическое действие ядерного взрыва. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 382 с.
8. Васильев А.П., Ильичев В.А., Касаткин В.В. и др. Ядерные взрывные технологии: эксперименты и промышленные применения. Снежинск.: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017. 508 с.
9. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. М.: Наука, 2007. 585 с.
10. Адушкин В.В., Спивак А.А., Чернышев А.К. Физическая картина подземного ядерного взрыва // На благо России, к 75-летию академика РАН Ю.А. Трутнева. Саров, 2002. С. 170–194.
11. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 439 с.
12. Boardman Ch. R. Engineering effects of underground nuclear explosions. Symposium on engineering with nuclear explosives. Las Vegas. Las Vegas. Nevada; 1970. Vol. 1. Springfield; P. 43–67.
13. Артамонова С.Ю., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Мерзлотно-гидрогеологическое строение района мирного подземного ядерного взрыва «Кратон» (Якутия) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 5. С. 722–736.
14. Clossman P.J. On the prediction of cavity radius produced by an underground nuclear explosion // Journal of Geographical research. 1969. Vol. 74, No. 15. P. 3935–3939 DOI: 10.1029/JB074i015p03935.
15. Ядерные испытания СССР. Том 4. Использование ядерных взрывов для решения народнохозяйственных задач и научных исследований. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. 200 с.
16. Васильев А.П. Ядерные взрывные технологии в мирных ядерных взрывах / Сборник материалов XIII Международной конференции. Снежинск, 20–24 марта 2017 года. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени Е.И. Забабахина, 2017. С. 10.
17. 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.

18. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Клишин В.И. Создание санитарно-защитной зоны объекта «Тайга» // Безопасность окружающей среды. 2009. № 4, С. 88–91.
19. Клишин В.И., Приходько Н.К., Камнев Е.Н. и др. Основные положения концепции специального горного отвода вокруг центральных зон подземных ядерных взрывов. Труды Международной конференции Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий. Москва 5–6 декабря 2005 г. Том 3. Воздействие радиоактивного загрязнения на антропогенные и сельскохозяйственные экосистемы. Дозы облучения населения в результате радиоактивного загрязнения окружающей среды при ядерных взрывах и авариях. Стратегии и контрмеры. СПб., 2006, С. 444–448.
20. Особые радиоактивные отходы. ИБРАЭ РАН. М.: ООО «САМ полиграфист», 2015. 240 с.
21. Касаткин В.В., Касаткин А.В., Василенко Е.М. и др. Концепция обращения с особыми радиоактивными отходами–мирными ядерными взрывами // Вестник РАЕН. 2017. Т. 17, № 2. С. 39–42.
22. Касаткин В.В., Камнев Е.Н., Ильичев В.А., Касаткин А.В. Экспертная оценка радиационного риска объектов мирных ядерных взрывов (МЯВ) на основе выбранных эмпирических критериев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 8. С. 196–201.
23. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Камнев Е.Н. и др. Георадиозоологические проблемы объектов мирных ядерных взрывов – пунктов размещения особых радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5, С. 289–293.
24. Дубасов Ю.В. Выход и истечение радиоактивных благородных газов при подземных ядерных взрывах различного назначения // Радиохимия. 2021. Т. 63, № 6. С. 591–600.
25. Абрамсон М.Г., Байдюк Б.В., Зарецкий В.С. и др. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений. М.: Недра, 1984. 207 с.
26. Капитонов А.М., Васильев В.Г. Физические свойства горных пород западной части Сибирской платформы. Красноярск: Сиб. федер. ун–т, 2011. 424 с.
27. Справочник по буровзрывным работам. Под редакцией Друкованого М.Ф. М.: Недра, 1976. 631 с.
28. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. Под редакцией Мельникова Н.В., Ржевского В.В., Протодякова М.М. М.: Недра, 1975. 279 с.
29. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов – 4-е изд. М: Недра, 1984. 379 с.
30. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов: учебник для вузов. 2-е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2002. 672 с.

Поступила: 31.10.2023 г.

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

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

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

Варфоломеева Ксения Владимировна – 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

Зеленцова Светлана Александровна – 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

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

Ильичев Вячеслав Алексеевич – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Ведущего проектно-изыскательского и научно-исследовательского института промышленной технологии Государственной корпорации «Росатом», Москва, Россия

Касаткин Андрей Владимирович – начальник управления Ведущего проектно-изыскательского и научно-исследовательского института промышленной технологии Государственной корпорации «Росатом», Москва, Россия

Касаткин Владимир Викторович – кандидат технических наук, начальник лаборатории радиационной безопасности Ведущего проектно-изыскательского и научно-исследовательского института промышленной технологии Государственной корпорации «Росатом», Москва, Россия

Для цитирования: Репин В.С., Рамзаев В.П., Библин А.М., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Ильичев В.А., Касаткин А.В., Касаткин В.В. 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

Estimation of the protected zone sizes for peaceful nuclear explosions based on quantitative patterns of the Earth's interior deformation

Victor S. Repin¹, Valery P. Ramzaev¹, Artem M. Biblin¹, Kseniya V. Varfolomeeva¹, Svetlana A. Zelentsova¹,
Konstantin A. Sednev¹, Vyacheslav A. Ilyichev², Andrey V. Kasatkin², Vladimir V. Kasatkin²

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

²ROSATOM State Atomic Energy Corporation, Joint-stock company VNIPIpromtekhnologii, Moscow, Russia

The designation of peaceful nuclear explosions as special radioactive waste imposes serious requirements to the territory of the explosion, its boundaries, and stakeholders informing about the prohibition of economic activities within these boundaries. The acting Sanitary Norms and Rules SanPiN 2.6.1.2819–10 “Ensuring radiation safety of the population living in areas where nuclear explosions were conducted (1965–1988) for peaceful purposes” do not define the size of the boundaries of protected zones. The aim of this paper is to analyze the scientific literature on the structure of deformation changes in the Earth's interior due to peaceful nuclear explosions and to justify quantitative ratios on the basis of which the size of protected zones can be estimated. The quantitative ratios were selected on the basis of a comparative analysis of the literature data. Using the ratios values made it possible to calculate the radii of deformation changes (cavities, crushing zones, fracturing zones, and zones of residual deformations) in various rocks. It is shown that the maximum values of fracturing radii for peaceful nuclear explosions carried out on the territory of the Russian Federation in hard rocks and in plastic rocks do not exceed 200 m and 250 m, respectively.

Key words: protected zone, peaceful nuclear explosions, underground nuclear explosions, special radioactive waste, rock formations, explosion cavity, cracking, crushing zone, destruction zone.

Authors' personal contribution

Repin V.S. – developed the research concept, supervised the research execution, wrote and edited the interim version and final version of the article.

Ramzaev V.P. – edited and finalized the article.

Biblin A.M. – collected and systematized literature data, edited the interim version of the article.

Varfolomeeva K.V. – collected and systematized literature data, edited the interim version of the article.

Zelentsova S.A. – collected and systematized literature data, edited the interim version of the article.

Sednev K.A. – collected literature data, the interim version of the article.

Ilyichev V.A. – expert assessment of literary sources, scientific editing of individual parts of the article,

Kasatkin A.V. – generalization of own and literature data, editing and finalization of the article.

Kasatkin V.V. – literature sources collection and analysis, organization of the authors of JSC “VNIPIpromtekhnologii”, coordination of article writing, editing of the article for publication.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025. “Scientific

substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Improving and developing methods for monitoring environmental objects in areas where peaceful nuclear explosions are carried out. Radiation-hygienic characteristics of sources of drinking water supply.”

References

1. Biblin AM, Khramtsov EV, Repin VS, Ivanov SA, Varfolomeeva KV, Sednev KA, et al. Radiation situation at the “Pirit” peaceful underground nuclear explosion site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 149–161. DOI: 10.21514/1998–426X–2022–15–4–149–161. (In Russian).
2. 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).
3. Ramzaev VP, Repin VS, Khramtsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2):27–33. (In Russian).
4. 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).
5. 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 ra-

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

- dionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2011;102(7): 672–80. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.04.003
6. Khramtsov EV, Repin VS, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Ivanov SA. Radiation-hygienic characteristic of the protected zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 111–123. (In Russian.) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123.
7. Arkhipov VN, Borisov VA, Budkov AM, Valko VV, Galiev AM, Goncharova OP, et al. Mechanical Action of Nuclear Explosion. Ministry of Defense of the Russian Federation. Central Institute of Physics and Technology. Moscow: FIZMATLIT; 2003. 382 p. (In Russian).
8. Vasiliev AP, Dubasov YuV, Ilyichev VA, Kasatkin VV, Myasnikov KV, Prihodko NK, et al. Nuclear explosive technologies: experiments and industrial applications. Snezhinsk: RFNC-VNIIEF; 2017. 508 p. (In Russian).
9. Adushkin VV, Spivak AA. Underground explosions. Moscow: Nauka; 2007. 585 p. (In Russian).
10. Adushkin VV, Spivak AA, Chernyshev AK. Physical view of the underground nuclear explosion. For the benefit of Russia. To the 75th anniversary of Academician of the Russian Academy of Sciences YuA Trutnev. 2002. p. 170–194. (In Russian).
11. Sadovsky MA. Selected works: Geophysics and physics of explosion. Moscow: Nauka; 2004. 439 p. (In Russian).
12. Boardmen ChR. Engineering effects of underground nuclear explosions. Proc. Symp. Eng. Nucl. Explos. Las Vegas, Nev.; 1970. Vol. 1. Springfield. 1970. P. 43–67.
13. Artamonova SY, Kozhevnikov NO, Antonov EY. Permafrost and groundwater settings at the site of “Kraton-3” peaceful underground nuclear explosion (Yakutia), from TEM data. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2013;54(5): 555–565. (In Russian). DOI: 10.1016/j.rgg.2013.04.007.
14. Clossman PJ. On the prediction of cavity radius produced by an underground nuclear explosion. *Journal of Geographical Research*. 1969;74(15): 3935–3939. DOI: 10.1029/JB074i015p03935.
15. Nuclear Tests of the USSR. Volume 4. Application of Nuclear Explosions for Solving National Economic Problems and Scientific Research. Sarov: RFNC-VNIIEF; 2000. 200 p. (In Russian).
16. Vasiliev AP. Nuclear explosive technologies in peaceful nuclear explosions. Proceedings of the XIII International Conference. 2017. Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after E.I. Zababakhin. Snezhinsk, March 20–24, 2017. 10 p. (In Russian).
17. 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.
18. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Klishin VI. Creation of the sanitary protection zone of the Taiga object. *Bezopasnost okruzhayushchey sredy = Environmental Safety*. 2009;(4): 88–91. (In Russian).
19. Klishin VI, Prihodko NK, Kamnev EN, Kasatkin VV, Ilyichev VA. Main statements of the concept of special mining allotment around the central zones of underground nuclear explosions. Proceedings of the International Conference Radioactivity after Nuclear Explosions and Accidents. Moscow, December 5–6, 2005, Vol. 3. Impact of radioactive contamination on anthropogenic and agricultural ecosystems. Doses to the population as a result of radioactive contamination of the environment in nuclear explosions and accidents. Strategies and Countermeasures. St. Petersburg; 2006. P. 444–448. (In Russian).
20. Special radioactive waste. IBRAE RAS. Moscow: SAM Polygraphist LLC; 2015. 240 p. (In Russian).
21. Kasatkin VV, Kasatkin AV, Vasilenko EM, Samorodova TS, Sedov NS. The concept of treatment of special radioactive waste (RW) – peaceful nuclear explosions (PNES). *Vestnik RAEN = Bulletin of the RANS*. 2017;17(2): 39–42. (In Russian).
22. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Kamnev EN, Kasatkin AV. Expert assessment of radiation risk of objects of peaceful nuclear explosions (PNE) on the basis selected empirical criteria. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin*. 2013;(8): 196–201. (In Russian).
23. 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).
24. Dubasov YV. Egress and outflow of radioactive noble gases in varied-purpose underground nuclear explosions. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 2021;63:851–860. (In Russian). DOI: 10.1134/S1066362221060187.
25. Abramson MG, Baidyuk BV, Zaretsky VS, Kirsanova AT, Matveeva AM, Pyankov NYa, et al. Reference book on mechanical and abrasive properties of rocks of oil and gas fields. Moscow: Nedra; 1984. 207 p. (In Russian).
26. Kapitonov AM, Vasiliev VG. Physical properties of rocks of the western part of the Siberian Platform. Krasnoyarsk: Siberian federal university; 2011. 424 p. (In Russian).
27. Reference book on drilling and blasting operations. Edited by Drukovanyi MF. Moscow: Nedra; 1976. 631 p. (In Russian).
28. Reference book (cadastre) of physical properties of rocks. Edited by Melnikov NV, Rzhnevsky VV, Protodyakov MM. Moscow: Nedra; 1975. 279 p. (In Russian).
29. Rzhnevskiy VV, Novik GYa. Fundamentals of rock physics: Textbook for universities. 4th ed. Moscow: Nedra; 1984. 379 p. (In Russian).
30. Timoshenko SP, Gere J. Mechanics of materials: textbook for universities. 2nd ed. Saint-Petersburg: “Lan”; 2002. 672 p. (In Russian).

Received: October 31, 2023

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)

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

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

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

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

Vyacheslav A. Ilyichev – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Joint-stock company «VNIIPromtekhnologii», Moscow, Russia

Vladimir V. Kasatkin – Candidate of Technical Sciences, head of the radiation safety laboratory, Joint-stock company «VNIIPromtekhnologii», Moscow, Russia

Andrey V. Kasatkin – Head of department, Joint-stock company «VNIIPromtekhnologii», Moscow, Russia

For citation: Repin V.S., Ramzaev V.P., Biblin A.M., Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Ilyichev V.A., Kasatkin A.V., Kasatkin V.V. 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. Vol. 16, No 4. P.134-147. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-134-147

Инструментальное исследование доз облучения и условий работы персонала рентгенохирургических бригад

Г.Н. Кайдановский¹, Е.Н. Шлеенкова¹, С.Ю. Бажин¹, В.А. Ильин¹, В.А. Тарита², В.Б. Фирсанов²

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

²Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никитина Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий России, Санкт-Петербург, Россия

Целью исследования являлась экспериментальная оценка условий формирования и величин эквивалентных доз облучения хрусталиков глаз, а также эффективных доз облучения персонала рентген-операционных кардиологического профиля. Особое внимание к контролю облучения хрусталиков глаз обусловлено необходимостью гармонизировать отечественные нормативные документы с новым стандартом безопасности МАГАТЭ GSR Part 3. Исследование было выполнено с использованием комплексного фантома, включающего антропоморфный фантом головы человека и водяной фантом, имитирующий торс участника рентгенохирургической бригады. Результаты оценок индивидуальных доз облучения хрусталиков глаз, полученных как на основании интегральных измерений методами термолюминесцентной дозиметрии, так и расчетным путем на основании измерений мощности амбиентного эквивалента дозы на рабочих местах персонала, показали, что при максимальных параметрах работы рентгеновской трубки (высокое напряжение и большое количество кадров в секунду) значения годовых доз облучения хрусталиков глаз даже у ассистирующего персонала могут достигать значений нового рекомендованного предела дозы в 20 мЗв. Выполненная оценка соотношения между дозами облучения всего тела (грудь), шеи и хрусталиков глаз показала возможность оценки доз облучения хрусталиков глаз у ассистирующего персонала рентгенохирургических бригад с помощью термолюминесцентного дозиметра, размещенного над защитным фартуком в области шеи. Для рассматриваемой категории персонала приоритетным является контроль за облучением именно хрусталиков глаз, а не всего тела.

Ключевые слова: хрусталик глаза, рентген-операционная, индивидуальная дозиметрия.

Введение

Особое внимание к дозам облучения хрусталиков глаз обусловлено необходимостью гармонизации отечественных нормативных документов с международными. В стандарте безопасности МАГАТЭ GSR Part 3 [1] вводится новое значение годового предела эквивалентной дозы внешнего облучения хрусталика глаза, равное 20 мЗв, усредненное за 5 последовательных лет, но не более 50 мЗв за любой отдельный год. В связи с этим в зарубежной научной литературе за последние 10 лет, согласно данным международной поисковой системы Pubmed [2], опубликовано более 500 исследований. Отдельно следует выделить ряд статей [3–5], посвященных контролю облучения хрусталиков глаз медицинского персонала, наиболее точно раскрывающих проблематику текущего исследования. В документе МАГАТЭ

[6] и Публикации 139 МКРЗ [7] приводятся результаты исследования, которое показало, что частота помутнения хрусталиков у интервенционистов оказалась в 4–5 раз выше, чем у необлученных лиц в контрольной группе (примерно 40–50% против 10%). В работах отечественных авторов [8–10] также рассматривается проблема облучения хрусталиков глаз медицинского персонала г. Санкт-Петербурга, а в статье [11] приведены результаты исследования доз облучения хрусталиков глаз персонала, работающего с радиофармацевтическими препаратами. В отечественной литературе данному вопросу уделено меньше внимания по причине достаточно высокого действующего предела дозы на хрусталик глаза персонала группы А, равного 150 мЗв в год. Снижение годового предела эквивалентной дозы внешнего облучения хрусталика глаза, установленного

Шлеенкова Екатерина Николаевна

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: eshleenkova@mail.ru

Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009)¹, и гармонизация с принятым стандартом МАГАТЭ пределом в 20 мЗв – дело ближайшего будущего. Подготовка к такому переходу требует детального изучения как условий работы, так и реальных доз облучения персонала рентгенохирургических бригад.

Цели исследования – 1) экспериментальная оценка условий формирования и величин эквивалентных доз облучения хрусталиков глаз, а также эффективных доз облучения персонала рентген-операционной, где проводятся преимущественно операции кардиологического профиля (коронаропластика, шунтография, ангиопластика, стентирование, баллонная пластика); 2) выявление возможности оптимизации количества используемых термолюминесцентных дозиметров (ТЛД) членами рентгенохирургических бригад.

Поставленные цели достигались путем решения следующих конкретных задач: измерение мощности амбиентного и направленного эквивалента дозы в местах размещения каждого из членов операционной бригады и в месте нахождения фантома; измерение индивидуальных эквивалентов доз $H_p(10)$ и индивидуальных эквивалентов доз облучения хрусталиков глаз $H_p(3)$ отдельных членов бригад с помощью ТЛД и расчетным способом; измерение индивидуальных эквивалентов доз $H_p(10)$ и индивидуальных эквивалентов доз $H_p(3)$ облучения хрусталиков глаз фантома, размещенного в рентген-операционной за все время проведения исследований с помощью ТЛД и расчетным способом; сопоставление и анализ полученных результатов.

Материалы и методы

Измерения проводились в рентген-операционной Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никитина МЧС России (ВЦЭРМ им. А.М. Никитина МЧС России). Измерения продолжались в период с 02.08.2021 г. по 14.10.2021 г. (2,5 месяца)

На весь период проведения измерений в рентген-операционной был установлен комплексный фантом, включающий в себя водяной фантом в форме параллелепипеда с закругленными гранями объемом 30 л, имитирующий торс участника рентгенохирургической бригады, с установленным сверху антропоморфным тканеэквивалентным фантомом головы человека², который владелец патента предоставил для проведения настоящего исследования. Фантом головы состоит из костей черепа с покровной мышечной тканью, головного мозга, пары глазных яблок с местами для размещения термолюминесцентных детекторов и век. Внешний вид фантома показан на рисунке 1. Фантом был размещен на расстоянии 2 м перпендикулярно к операционному столу за спиной рентгенохирурга, высота комплексного фантома составляла 1,7 м (средний рост участника бригады). За период



Рис. 1. Внешний вид фантома
[Fig. 1. Appearance of the phantom]

исследования было выполнено 160 операций кардиологического профиля, общее время всех операций составило 114,25 ч (в течение всех этих операций фантом находился в рентген-операционной).

В проводимом нами исследовании приняли участие 3 рентгенохирургические бригады, каждая из которых включала хирурга, анестезиолога и ассистента. В отличие от исследования, описанного в работе [12], где была возможность измерения индивидуальных эквивалентов доз за одну операцию и исследования [5], где измерения проводились за рабочий день, в данном исследовании приводятся результаты доз, накопленных персоналом каждой из бригад за все время наблюдения (2,5 месяца). 3 операционными бригадами, которые использовали индивидуальные дозиметры, выполнена 71 операция за общее время 52,08 ч (кроме этих бригад, согласившихся на эксперимент, в рентген-операционной работали и другие бригады, в связи с этим количество операций и время операций, проведенных 3 бригадами, отличается от общего количества операций, при которых фантом находился в операционной). Взаимное расположение участников рентгенохирургических бригад относительно операционного стола при проведении операций схематично показано на рисунке 2.

Все интервенционные исследования выполнялись на рентгеновском аппарате Artis Zee (фирма «Siemens», 2011 г.), выполненном по типу С-дуга. Согласно руководству по эксплуатации на данный аппарат, напряжение на трубке может меняться от 50 до 125 кВ, а скорость съемки – от 4 до 30 кадров/с. Все исследования выполнялись с автоматическим контролем экспозиции, при котором напряжение и сила тока на трубке автоматически меняются в режиме реального времени в зависимости от толщины и плотности анатомической области исследования.

При исследовании использовались следующие средства измерений: дозиметр RAM ION, с помощью которого были измерены мощности амбиентных и направленных

¹ Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 г. № 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.)]

² Патент на полезную модель № 161345, владелец патента – Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства (Санкт-Петербург, Россия) (RU) [Utility model patent No. 161345, patent holder – Research Institute of Industrial and Maritime Medicine of the Federal Medical Biological Agency, (St. Petersburg, Russia) (RU) (In Russ.)]

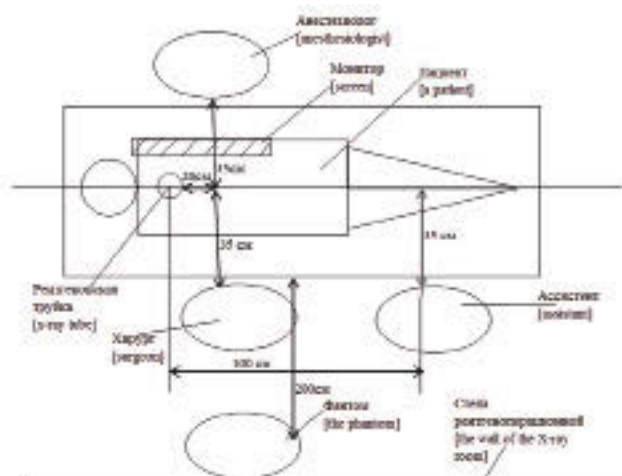


Рис. 2. Схема взаимного расположения участников рентгенохирургических бригад относительно операционного стола при проведении операций, использовавшаяся для проведения измерений

[Fig. 2. Scheme of the relative position of the members of the X-ray surgical teams relative to the operating table during operations, used for measurements]

ных эквивалентов доз на местах размещения персонала и фантома; диапазон измерений мощности амбиентного эквивалента дозы $H'(10)$ фотонного излучения, мощности направленного эквивалента дозы $H'(3)$ фотонного излучения от $1 \text{ мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$ до $500 \text{ мЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$.

Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений дозиметра RAM ION для мощности амбиентного эквивалента дозы $H'(10)$ фотонного излучения не превышали $\pm 15\%$; для мощности направленного эквивалента дозы $H'(3)$ фотонного излучения не превышали $\pm 20\%$.

Были использованы индивидуальные термолюминесцентные дозиметры (ТЛД), откалиброванные для измерения индивидуальных эквивалентов доз $H_p(10)$ персонала и фантома; индивидуальные термолюминесцентные дозиметры типа Eye-D, использованные для измерения индивидуального эквивалента доз облучения хрусталика глаза $H_p(3)$; термолюминесцентные детекторы типа ДТГ-4, раз-

мещенные непосредственно в глазах фантома головы. Считывание производилось с помощью комплекса дозиметрического термолюминесцентного «ДОЗА-ТЛД». Диапазон измерения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ фотонного излучения: $20,0 \text{ мкЗв} - 10 \text{ Зв}$, диапазон измерения индивидуального эквивалента дозы в хрусталиках глаз $H_p(3)$ фотонного и бета-излучения: $20,0 \text{ мкЗв} - 10 \text{ Зв}$. Основная относительная погрешность измерения индивидуальных эквивалентов дозы $H_p(10)$ и $H_p(3)$ фотонного излучения с энергией от 15 кэВ до 3 МэВ не превышает $\pm 20\%$.

Индивидуальные дозиметры для контроля облучения хрусталиков глаз носили только ассистенты (дозиметры размещались на резинке на голове, таким образом, что дозиметр оказывался на уровне глаза со стороны источника излучения). В связи с тем, что рентгенохирурги и анестезиологи не смогли обеспечить регулярное ношение предложенных им ТЛД-дозиметров, они были исключены из рассмотрения, так как, согласно 139 Публикации МКРЗ [7], только правильное и регулярное ношение персоналом индивидуальных дозиметров позволяет правильно оценить дозы облучения персонала, полученные при проведении интервенционных исследований, ввиду очень сложной и неравномерной геометрии полей облучения при данном виде медицинского исследования.

Ассистенты, в отличие от рентгенохирургов и анестезиологов, как правило, не находятся в прямой проекции пучка, и их облучение (без учета использования средств индивидуальной защиты (СИЗ)) можно считать достаточно равномерным. В дальнейшем в данной работе мы будем больше концентрироваться на этой категории персонала, т.к. рентгенохирурги и анестезиологи требуют более детального дальнейшего изучения.

Оценка доз облучения хрусталиков глаз $H_p(3)$ и всего тела $H_p(10)$ персонала и фантома производилась расчетным путем, на основе значений мощностей доз и времени облучения по формуле:

$$H_p(d) = t_2 \times H'(d), \quad (1)$$

где t_2 – длительность работы источника излучения за весь период работы бригады и нахождения фантома в операционной (табл. 1);

Таблица 1

Длительность и количество проведенных операций

[Table 1

Duration and number of operations performed]				
№ бригады [Brigade number]	Число операций [Number of operations]	Суммарное время операций, $t_1(\text{ч})$ [Total time of operations, $t_1(\text{h})$]	Время работы источника излучения во время операций, $t_2(\text{ч})$ [Operating time of the radiation source during operations, $t_2(\text{h})$]	Среднее время работы источника излучения во время проведения операций, диапазон, (мин) [Average operating time of the radiation source during operations, range, (min)]
1	42	31,67	8,61	8,83 (min 1,7; max 53,5)
2	8	7,33	1,39	11,93 (min 3,7; max 37,6)
3	21	13,08	2,01	7,29 (min 1,0; max 35,3)
Фантом [phantom]	160	114,25	23,95	–

$H'(d)$ – мощность амбиентного или направленного эквивалента дозы в операционной (табл. 2, 3).

Измерение мощности дозы на рабочих местах в позициях ассистента и анестезиолога (см. рис. 2) прибором RAM ION проводилось при напряжении на трубке 109 кВ, токе 559,4 мА, в импульсном режиме с частотой 30 снимков/с. Рентгеновская трубка размещалась под операционным столом, имеющим защитные шторы только в месте размещения хирурга. Измерения проводились только для задне-передней проекции облучения пациента; углы наклона трубки не изменяли.

Результаты и обсуждение

Длительность, количество операций и время работы рентгеновской трубки приведены в таблице 1.

Как можно увидеть из таблицы 1, наибольшее количество операций выполнила бригада № 1, а длительность работы источника излучения во время операций может су-

щественно различаться в зависимости от типа процедуры и состояния сосудов пациента.

Результаты измерений мощностей амбиентного эквивалента дозы на уровне груди $H'(10)$ и направленного эквивалента дозы на уровне хрусталика глаза $H'(3)$ для различных позиций участников операционных бригад относительно ИИИ и операционного стола представлены в таблице 2.

Приведенные в таблице 2 данные показывают, что мощность дозы облучения анестезиолога и рентгенохирурга значительно выше, чем ассистента, это объясняется более близким нахождением анестезиолога и рентгенохирурга относительно рентгеновской трубки, при этом видно, что облучение рентгенохирурга наиболее неравномерно: мощность дозы на высоте 1,7 м и 1,5 м отличается в 0,7 раза.

Результаты оценочных расчётов и реальных измерений $H_p(3)$ с помощью индивидуальных ТЛД ассистентов приведены в таблице 4.

Таблица 2

Результаты измерения мощности амбиентного и направленного эквивалента дозы в условиях рентгенооперационной, выполненные дозиметром RAM ION

[Table 2]

The results of measuring the ambient and directional dose equivalent rate in the conditions of the X-ray operating room, performed by the RAM ION dosimeter]

Персонал [Personnel]	$H'(10)$ на высоте 1,5 м, мЗв/ч [$H'(10)$ at a height of 1.5 m, mSv/h]	$H'(3)$ на высоте 1,7 м, мЗв/ч [$H'(3)$ at a height of 1.7 m, mSv/h]
Хирург (позиция-1) [Surgeon (Position-1)]	3,20	2,20
Анестезиолог (позиция-2) [Anesthetist (Position-2)]	3,10	3,06
Ассистент хирурга (позиция-3) [Surgeon's assistant (Position-3)]	0,54	0,56

Таблица 3

Результаты измерений доз, зарегистрированных термолюминесцентными дозиметрами, размещёнными на/в фантоме, и расчетные значения индивидуального эквивалента дозы

[Table 3]

Results of measurements of doses registered by TLD placed on/in a phantom and calculated values of individual dose equivalent]

Положение дозиметра [Dosimeter position]	Доза, измеренная ТЛД, мЗв [Dose measured by TLD, mSv]	Мощность дозы $H(d)^*$, мЗв/ч [Dose rate $H(d)^*$, mSv/h]	Расчетные значения дозы $H_p(d)$, мЗв [Estimated dose $H_p(d)$, mSv]
Грудь* [Breast*]	13,45	0,249	5,96
Шея* [Neck*]	11,83	0,219	5,24
Левый висок** [Left temple**]	13,84	0,256	6,13
Правый висок** [Right temple**]	7,18	0,132	3,16
Левый глаз** [Left eye **]	12,10	0,224	5,36
Правый глаз** [Right eye**]	11,19	0,207	4,96
Среднее [average]	11,65	0,22	5,16

*Полученное значение дозы соответствует индивидуальному эквиваленту дозы $H_p(10)$
[*the resulting dose value corresponds to the individual dose equivalent $H_p(10)$].

**Полученное значение дозы соответствует индивидуальному эквиваленту дозы $H_p(3)$
[**the resulting dose value corresponds to the individual dose equivalent $H_p(3)$].

Таблица 4

Результаты оценочных расчётов индивидуальных эквивалентов доз и реальных измерений $H_p(3)$ с помощью индивидуальных ТЛД ассистентов

[Table 4]

Results of estimation calculations of individual dose equivalents and real measurements of $H_p(3)$ using individual TLD for assistants]

№ бригады [Brigade number]	Специалист [Specialist]	Время облучения, ч [Time of exposure, h]	$H_p(10)$, мЗв, расчёт по данным значений мощности дозы на высоте 1,5 м [$H_p(10)$, mSv, calculated from dose rate data at a height of 1.5 m]	$H_p(3)$, мЗв, расчёт по данным значений мощности дозы [$H_p(3)$ ¹ , mSv, calculation from dose rate data]	$H_p(3)$, мЗв, измеренная с помощью ТЛД [$H_p(3)$, mSv, measured with TLD]
1	Ассистент (дозиметр № 40) [Assistant (dosimeter № 40)]	8,61	4,65	4,82	1,42
2	Ассистент (дозиметр № 077) [Assistant (dosimeter № 077)]	1,39	0,75	0,77	0,37
3	Ассистент (дозиметр № 075) [Assistant (dosimeter № 075)]	2,01	1,08	1,12	0,36

При расчетах для оценки максимально возможных доз облучения хрусталика глаза анестезиологов и ассистентов нами были взяты значения мощности дозы на правленного эквивалента $H'(3)$, измеренные прибором RAM ION при высоком значении напряжения на трубке 109 кВ, токе 559,4 мА и при максимальном количестве кадров в секунду (30 кадров/с) – данные в таблице 4 учитывали период работы 2,5 месяца, следовательно, годовые дозы могут оказаться в 4 раза выше представленных значений т.е. могут приблизиться к 20 мЗв. При проведении реальных операций мощность дозы меняется и зависит как от частоты рентгено съемки, так и от меняющегося во время операции напряжения на трубке. Наблюдение за работой бригады во время операции показало, что только хирург постоянно находится рядом с операционным столом. Ассистент и анестезиолог часть времени находятся за защитой в пультавой, где мощность дозы значительно ниже, и следовательно, значения доз облучения хрусталиков глаз ассистентов должны быть ниже, чем полученные нами максимальные значения, что подтверждается дозами, зарегистрированными ТЛД ассистента.

Результаты измерений доз облучения комплексного фантома, размещенного в помещении рентген-операционной, с помощью ТЛД и расчетным способом представлены в таблице 3.

Приведенные в таблице 3 данные по показаниям ТЛД и при измерении мощности дозы в разных точках на месте фантома показывают, что дозы облучения хрусталиков глаз практически совпадают с дозой, зарегистрированной дозиметром, размещенным на шее. При этом дозы, зарегистрированные дозиметрами, размещенными на висках, могут отличаться (из-за экранирования костями черепа). Различия в дозах, полученных с помощью ТЛД и расчетным способом, могут быть связаны с тем, что при моделировании эксперимента для измерения мощности дозы на месте нахождения фантома не учитывались динамические факторы, например, изменения положений членов рентгенохирургической бригады относительно

фантома или смена углов наклона рентгеновской трубки (РГ-трубки). При смоделированных экспериментальных измерениях рентгенохирург находился между РГ-трубкой и фантомом, как бы экранируя его, в реальности же он мог отодвигаться, и мощности дозы на фантом возрастали. Также при экспериментальных условиях трубка находилась в задне-передней проекции, и основной поток обратного излучения был направлен вниз, в случае же поворота РГ-трубки влево (в сторону рентгенохирурга и фантома) основной поток рассеянного излучения будет направлен в их сторону, увеличивая мощность дозы. Подробно про зависимость мощности дозы излучения на рабочем месте персонала от положения РГ-трубки написано в статье [13].

Фантом находился в операционной существенно дольше, чем все 3 бригады, участвовавшие в эксперименте. Поэтому данные значения могут быть использованы только для оценки соотношения между дозами облучения всего тела (грудь), шеи и хрусталиков глаз, а не для оценки потенциальных доз облучения хрусталиков глаз членов рентгенохирургической бригады.

Измерения мощности дозы были проведены нами только в передне-задней проекции, но данные, полученные на фантоме расчетным способом и методом ТЛД, подтверждают необходимость дальнейшего изучения условий формирования и величин эквивалентных доз облучения хрусталиков глаз рентгенохирургов. Поскольку рентгенохирург находится в максимальной близости к рентгеновской трубке и практически не покидает свое рабочее место на протяжении всей операции, его уровни облучения могут оказаться еще выше, чем полученные нами максимальные значения мощностей доз.

Несмотря на отдаленность фантома от операционного стола и возможное его частичное экранирование участками рентгенохирургических бригад при проведении манипуляций, данные, полученные с использованием фантома, могут быть использованы для оценки соотношения между дозами облучения всего тела (грудь), шеи и хру-

сталиков глаз для ассистирующего персонала, так как данный персонал, в отличие от рентгенохирургов и анестезиологов, не находится в прямой проекции пучка и его облучение достаточно равномерно.

В таблице 5 приведены коэффициенты, с помощью которых можно оценить дозу облучения хрусталиков глаз по показаниям дозиметра, размещенного на шее, для различных позиций членов рентгенохирургической бригады. Для ассистирующего персонала в качестве консервативной оценки можно использовать значения показаний шейного дозиметра без переходных коэффициентов.

Таким образом, при невозможности использования ассистентом рентгенохирурга дополнительного дозиметра, откалиброванного в терминах индивидуального эквивалента дозы $H_p(3)$, возможно продолжать использовать существующий набор индивидуальных дозиметров для оценки эквивалентной дозы в хрусталиках глаз.

Особый интерес, с точки зрения организации радиационной защиты и проведения радиационного контроля, представляет вопрос о том, какие органы и ткани персонала являются наиболее облучаемыми – все тело или хрусталики глаз. Еще в 2013 г. [14] этот вопрос был рассмотрен рядом авторов в более широком смысле, а именно было показано, что даже при равномерном облучении тела че-

ловека фотонным излучением с энергией более 50,0 кэВ эквивалентная доза облучения хрусталика глаза всегда больше, чем эффективная доза, в 1,2–2,0 раза, а при энергии менее 50,0 кэВ это соотношение может достигать 5 раз даже при отсутствии средств защиты. В исследованиях на фантоме было показано, что для косвенной оценки доз облучения хрусталиков глаза можно использовать ТЛД, откалиброванный для измерения $H_p(10)$ и размещаемый в области шеи (наиболее точный результат).

Для оценки соотношения доз облучения хрусталика глаза и всего тела нами были взяты результаты измерений квартальных индивидуальных эквивалентов доз облучения персонала отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения клинической межрайонной больницы в г. Гатчине. Нужно отметить, что по условиям труда участники рентгенохирургических бригад используют защитные фартуки, поэтому в постоянном индивидуальном дозиметрическом контроле они используют по 2 ТЛД. В таблице 6 приведены результаты измерения индивидуальных эквивалентов доз, зарегистрированных ТЛД, размещаемыми на груди под защитным фартуком $H_{pr}(10)$ и над фартуком в области шеи $H_{rsh}(10)$. Там же приведены величины эффективных доз E , рассчитанных по формуле 6.5 п. 6.7.2 МУ 2.6.1.3015-12³:

Таблица 5

Соотношение между мощностью дозы на уровне хрусталика глаза (высота 1,7 м) и мощностью дозы на уровне шеи (высота 1,5 м) для участников рентгенохирургических бригад и фантома, и соотношение $H_p(3)/H_p(10)$ для фантома по показаниям ТЛД

[Table 5]

Correlation between dose rate at the level of the lens of the eye (height 1.7 meters) and dose rate at the level of the neck (height 1.5 meters) for members of the CRS teams and phantom, and the ratio $H_p(3)/H_p(10)$ for phantom according to TLD

Позиция [Position]	Соотношение $H'(3)/H^*(10)_{1,5 \text{ метра}}$ [Ratio $H'(3)/H^*(10)_{1.5 \text{ meters}}$]
Анестезиолог [Anesthetist]	0,98
Ассистент [Assistant]	1,03
Соотношение $H_p(3)/H_p(10)$ по показаниям ТЛД [Ratio $H_p(3)/H_p(10)$ according to TLD indications]	
Фантом [Phantom]	1,02
Соотношение $H'(3)/H'(10)_{1,5 \text{ м}}$ [Ratio $H'(3)/H'(10)_{1.5 \text{ meters}}$]	
Фантом [Phantom]	0,99

Таблица 6

Дозы облучения работников за один квартал, мЗв

[Table 6]

Exposure doses of workers for one quarter, mSv

Член бригады [Brigade member]	1	2	3	4	5	6	7	8
$H_{pr}(10)$	0,21	0,18	0,33	0,47	0,78	0,24	0,25	0,26
$H_{rsh}(10)$	0,40	2,73	1,13	1,03	6,39	3,36	0,61	1,14
E	0,14	0,18	0,23	0,31	0,63	0,23	0,17	0,19

³ МУ 2.6.1.3015-12. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций. Радиационная гигиена. 2012. 5(3). 77–86. [Methodical guidelines 2.6.1.3015-12. "Organization and management of individual dosimetry of medical staff". Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene. 2012;5(3):77-86 (In Russ.)]

$$E=0,60 \cdot H_{\text{рг}}(10)+0,025 \cdot H_{\text{рш}}(10), \text{ мЗв} \quad (2)$$

Ранее было показано, что по данным $H_{\text{рш}}(10)$ можно консервативно оценить дозы облучения хрусталиков глаз. Видно, что эффективные дозы во всех случаях оказываются в 3–10 раз меньше, чем дозы облучения хрусталиков глаз, т.е. при превышении нового предела дозы облучения хрусталика глаза (20 мЗв) эффективная доза всегда будет ниже нормируемого значения. Это говорит о том, что при оценке потенциального радиационного вреда для здоровья персонала рентген-операционной, приоритетное значение могут иметь дозы облучения хрусталиков глаз, поэтому участникам рентгенохирургических бригад (главным образом рентгенохирургу) следует использовать подвесные рентгенозащитные экраны, а также специальные очки для защиты хрусталиков глаз [13].

Заключение

Сопоставление и анализ результатов измерений, полученных с помощью различных средств измерения, позволили оценить дозы облучения хрусталиков глаз ассистирующего персонала у 3 бригад, участвовавших в настоящем исследовании. Показано, что при максимальных параметрах работы рентгеновской трубки (высокое напряжение и большое количество кадров с секунду) расчетные значения годовой эквивалентной дозы облучения хрусталиков глаз ассистентов могут достигать значений в 20 мЗв. Реально измеренные значения, однако, составляют меньше половины от полученных расчетных значений, что связано с тем, что они не находятся в операционной в течение всего периода работы РГ-трубки.

Результаты исследования явились основой для выработки требований по организации и проведению индивидуального дозиметрического контроля этой категории персонала⁴.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- при проведении дозиметрического контроля облучения хрусталиков глаз ассистирующего персонала, работающего в условиях рентген-операционной, чтобы оценить дозу облучения хрусталиков глаз, достаточно использовать 1 термолюминесцентный дозиметр, откалиброванный в единицах $H_{\text{р}}(10)$, размещенный над защитным фартуком в области шеи.

- при оценке потенциального радиационного вреда для здоровья персонала рентген-операционной приоритетное значение имеют дозы облучения хрусталиков глаз.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кайдановский Г.Н. – научное руководство исследованием, определение цели, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, сбор данных, обработка и анализ полученных результатов.

Шлеенкова Е.Н. – определение цели, поиск и анализ литературы, сбор данных, обработка и анализ полученных результатов, написание текста статьи.

Бажин С.Ю. – поиск и анализ литературы, анализ и интерпретация результатов, редактирование текста статьи, перевод.

Ильин В.А. – помощь в организации проведения исследования.

Тарита В.А. – помощь в организации проведения исследования, анализ результатов.

Фирсанов В.Б. – помощь в организации проведения исследования, анализ результатов.

Благодарности

Авторы выражают свою благодарность Научно-исследовательскому институту промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства (Санкт-Петербург, Россия) за предоставленный фантом головы и сотрудникам рентген-операционной Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России за помощь в сборе данных.

Информация о конфликте интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена на безвозмездной основе.

Литература

1. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2015. 518 p. (In Russian).
2. Website National Library of Medicine. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=eye+lens+dosimetry&filter=date&arch.y_10 (Дата обращения: 25.05.2023).
3. Vanhavere F., Carinou E., Domienik J., et al. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project // Radiation Measurements. 2011. Vol. 46, Is. 11. P. 1243-1247.
4. Guidelines for Radiation Protection and Dosimetry of the Eye Lens. Nederlandse Commissie Voor Stralingsdosimetrie. Report 31 of the Netherlands Commission on Radiation Dosimetry, May 2018.
5. Merrachi N.A., Bouchard-Bellavance R., Perreault P., et al. Eye Lens Dosimetry in Interventional Radiology: Assessment With Dedicated Hp(3) Dosimeters // Canadian Association of Radiologists journal. 2021. Vol. 72, No 2. P. 317-323. doi: 10.1177/0846537120911755. Epub 2020 Mar 27. PMID: 32216558.
6. Radiation Protection of Patients (RPOP) – the leading resource for health professionals, patients and public on the safe and effective use of radiation in medicine. URL: <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/interventional-procedures/interventional-cardiology/staff> Available on: <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/interventional-procedures/interventional-cardiology/staff> (Дата обращения: 17.05.2023 г.).
7. ICRP. 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139 // Annals of the ICRP. 2018. Vol. 47, No 2.
8. Иванов С.И., Логинова С.В., Аكوпова Н.А., и др. Проблемы дозиметрии хрусталика глаза // Медицинская радиоло-

⁴ МУ 2.6.1.3015-12. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций. Радиационная гигиена. 2012. 5(3). 77–86. [Methodical guidelines 2.6.1.3015-12. "Organization and management of individual dosimetry of medical staff". Radiation Hygiene. 2012;5(3):77-86. (In Russ.)]

- гия и радиационная безопасность. 2014. Т. 59, № 4, С. 67-72.
9. Кайдановский Г.Н., Шлеенкова Е.Н. О проблемах контроля доз облучения хрусталика глаза // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 75-80.
 10. Шлеенкова Е.Н., Голиков В.Ю., Кайдановский Г.Н., и др. Результаты контроля доз облучения хрусталиков глаз у медицинского персонала г. Санкт-Петербурга // Радиационная гигиена. 2019 Т. 12. № 4. С. 29-36.
 11. Шлеенкова Е.Н., Бажин С.Ю., Кайдановский Г.Н., и др. О необходимости проведения регулярного контроля доз облучения хрусталиков глаз у персонала, занятого на работах с использованием фармацевтических препаратов // Радиационная гигиена. 2021 Т. 14. № 3. С. 101-111.
 12. Čemusová Z., Ekendahl D., Judas L., Assessment of Eye Lens Doses in Interventional Radiology: A Simulation in Laboratory Conditions // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol. 170, No 1-4. P. 256-260.
 13. Сарычева С.С. Особенности применения средств радиационной защиты для персонала рентгенохирургических операционных // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 76-84. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-76-84>.
 14. Рубцов В.И., Клочков В.Н., Требухин А.Б., и др. Контроль эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза и оценка возможности ее снижения. // АНРИ. 2013. №3 (74). С. 32-37.

Поступила: 02.05.2023 г.

Кайдановский Георгий Наумович – исполняющий обязанности ведущего научного сотрудника лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Шлеенкова Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: eshleenkova@mail.ru

Бажин Степан Юрьевич – исполняющий обязанности заведующего лабораторией радиационного контроля, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Ильин Владимир Александрович – техник-исследователь лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Тарита Вольдемар Андреевич – кандидат медицинских наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела биоиндикации научно-исследовательского центра, Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Санкт-Петербург, Россия

Фирсанов Владимир Борисович – ведущий электроник научно-исследовательского отдела биоиндикации научно-исследовательского центра, Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Кайдановский Г.Н., Шлеенкова Е.Н., Бажин С.Ю., Ильин В.А., Тарита В.А., Фирсанов В.Б. Инструментальное исследование доз облучения и условий работы персонала рентгенохирургических бригад // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 148-157. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-148-157

Instrumental study of radiation doses and working conditions for personnel of X-ray surgical teams

Georgiy N. Kaidanovsky¹, Ekaterina N. Shleenkova¹, Stepan Yu. Bazhin¹, Vladimir A. Ilyin¹, Voldemar A. Tarita², Vladimir B. Firsanov²

¹ 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

² Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

The purpose of the study was an experimental assessment of the conditions for the formation and values of equivalent doses of irradiation of the lenses of the eyes, as well as the effective doses of irradiation of personnel in X-ray operating rooms of a cardiological profile. Particular attention to the control of eye lens irradiation is due to the need to harmonize domestic regulatory documents with the new IAEA safety standard GSR Part 3. The study was performed using a complex phantom, including an anthropomorphic phantom of a human head and a water phantom imitating the torso of an X-ray surgical team member. The results of assessments of individual eye lens irradiation doses, obtained both on the basis of integrated measurements by thermoluminescent dosimetry methods, and by calculation based on measurements of the ambient dose equivalent rate at the personnel workplaces, showed that at the maximum operating parameters of the X-ray tube (high voltage and a large number of frames per second), annual doses to the lenses of the eyes, even for assisting personnel, may exceed the new recommended dose limit of 20 mSv. The assessment of the ratio between the doses of irradiation of the whole body (chest), neck and lenses of the eyes showed the possibility of estimating the doses of irradiation of the lenses of the eyes of the assisting personnel of X-ray surgical teams using a thermoluminescent dosimeter placed over a protective apron in the neck area. For the category of personnel under consideration, the priority is to control the irradiation of the lenses of the eyes, and not the whole body.

Key words: eye lens, X-ray operating room, individual dosimetry.

Personal contribution of authors

G.N. Kaidanovsky – scientific management of the study, determination of the goal, development of the design of the study, formulation of scientific hypotheses, data collection, processing and analysis of the results.

E.N. Shleenkova – defining the goal, searching and analyzing literature, collecting data, processing and analyzing the results, writing the text of the article.

S.Yu. Bazhin – search and analysis of literature, analysis and interpretation of the results, editing the text of the article, translation.

V.A. Ilyin – assistance in organizing the study.

V.A. Tarita – assistance in organizing the study, analysis of the results.

V.B. Firsanov – assistance in organizing the study, analysis of the results.

Acknowledgements

The authors of the expression express their gratitude to the Research Institute of Industrial and Maritime Medicine of the Federal Medical Biological Agency, (St. Petersburg, Russia) for providing the head phantom and employees of the X-ray operating room Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia for assistance in data collection.

Sources of funding

The work was done free of charge.

Information on the conflict of interest

There is no conflict of interest.

References

1. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2015. 518 p. (In Russian)
2. Website National Library of Medicine. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=eye+lens+dosimetry&filter=datesearch.y_10 (Accessed: 25.05.2023).
3. Vanhavere F, Carinou E, Domienik J, Donadille L, Ginjaume M, Gualdrini G, et al. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project. *Radiation Measurements*. 2011;46(11): 1243-1247.
4. Guidelines for Radiation Protection and Dosimetry of the Eye Lens. Nederlandse Commissie Voor Stralingsdosimetrie. Report 31 of the Netherlands Commission on Radiation Dosimetry, May 2018.
5. Merrachi NA, Bouchard-Bellavance R, Perreault P, Gilbert P, Soulez G, Bouchard L, et al. Eye Lens Dosimetry in Interventional Radiology: Assessment With Dedicated Hp(3) Dosimeters. *Canadian Association of Radiologists journal*. 2021;72(2): 317-323. doi: 10.1177/0846537120911755. Epub 2020 Mar 27. PMID: 32216558.

Ekaterina N. Shleenkova

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russian Federation. E-mail: eshleenkova@mail.ru

6. Radiation Protection of Patients (RPOP) – the leading resource for health professionals, patients and public on the safe and effective use of radiation in medicine. Available on: <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/interventional-procedures/interventional-cardiology/staff> <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/interventional-procedures/interventional-cardiology/staff> (Accessed: 17.05.2023)
7. ICRP, 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139. *Annals of the ICRP*. 2018; 47(2).
8. Ivanov S., Loginova SV, Akopova NA, Okhrimenko SE, Nurlybaev KN. Problems of eye lens dosimetry. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2014;59(4): 67-72.
9. Kaydanovsky GN, Shleenkova EN. On the problems of controlling doses of irradiation of the lens of the eye. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(3): 75-80.
10. Shleenkova EN, Golikov VYu, Kaidanovsky GN, Bazhin SYu, Ilyin VA. Results of eye lens doses control of medical personnel in St. Petersburg. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4):29-36. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-29-36>.
11. Shleenkova EN, Bazhin SYu, Kaidanovsky GN, Chipiga LA, Ilyin VA. About the requirements of regular monitoring of doses for the eye lens of the staff working with radiopharmaceuticals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3):101-111. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-3-101-111>
12. Čemusová Z, Ekendahl D, Judas L. Assessment of Eye Lens Doses in Interventional Radiology: A Simulation in Laboratory Conditions. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;170(1-4): 256–260.
13. Sarycheva SS. Features of radiation protection equipment for the staff of X-ray operating rooms. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 76-84. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-76-84>.
14. Rubtsov VI, Klochkov VN, Trebukhin AB, Nefedov AYU, Klochkova EV, Nurlybaev KN, et al. Monitoring of Dose Equivalent to the Lens of the Eye and Evaluation of the Possibility of its Reduction. *ANRI = ANRI*, 2013;3(74): 32-37.

Received: May 02, 2023

Georgiy N. Kaidanovsky – acting Leading 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For correspondence: 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 Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: eshleenkova@mail.ru)

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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Vladimir A. Ilyin – Technician-Researcher at 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Voldemar A. Tarita – Candidate of medical sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Research Department of Bioindication of the Research Center, All-Russian Center for Emergency and Radiation Medicine named after A.M. Nikiforov of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief, St. Petersburg, Russia

Vladimir B. Firsanov – Leading Electronics Engineer of the Research Department of Bioindication of the Research Center, All-Russian Center for Emergency and Radiation Medicine named after A.M. Nikiforov of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief, St. Petersburg, Russia

For citation: Kaidanovsky G.N., Shleenkova E.N., Bazhin S.Yu., Ilyin V.A., Tarita V.A., Firsanov V.B. Instrumental study of radiation doses and working conditions for personnel of X-ray surgical teams. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 148-157. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-148-157

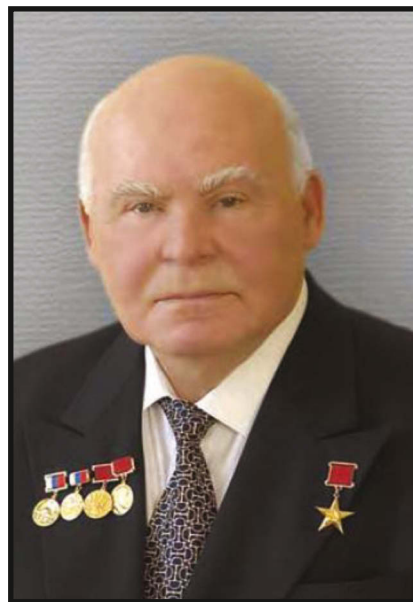
Памяти Леонида Андреевича Ильина – выдающегося советского и российского ученого (1928–2023)

7 октября 2023 г. ушел из жизни заслуженный деятель науки, великий ученый с мировым авторитетом в области радиобиологии и радиационной гигиены, основоположник радиационной медицины.

Леонид Андреевич родился 15 марта 1928 г. в г. Харькове Украинской ССР. После окончания с отличием 1-го Ленинградского медицинского института (военно-морской факультет) в 1953 г. служил на Черноморском флоте начальником медицинской службы боевого корабля, затем организовал первую на Черноморском флоте радиологическую лабораторию. С 1958 г. – старший научный сотрудник радиологического отдела Научно-исследовательского института Военно-морского флота в г. Ленинграде. В 1961 г. поступил на работу в Ленинградский научно-исследовательский институт радиационной гигиены (Институт) и через месяц был избран по конкурсу руководителем лаборатории радиационной защиты. В 1962 г. Л.А. Ильин был назначен на должность заместителя директора по научной работе, он стал курировать и руководить всеми медико-биологическими исследованиями Института.

Личная харизма, увлеченность наукой, умение видеть перспективные направления и ставить задачи сотрудникам помогли ему быстро собрать работоспособный коллектив молодых учёных. Первоначально лаборатория защиты продолжала исследование физических методов дезактивации поверхностей, загрязненных радиоактивными веществами (РВ), но под руководством Л.А. Ильина перешла на новую, жизненно важную в то время тему – изучение метаболизма свежих продуктов деления урана в живых организмах, их биологического действия, поиск средств защиты от внешнего ионизирующего излучения и методов ускорения выведения радиоизотопов из организма человека. Первый этап исследований проводился на подопытных животных – крысах и мышах в виварии Института, на более крупных животных (поросята и другие животные) исследовались способы дезактивации кожи. На втором этапе исследований изучали метаболизм радиоизотопов в организме человека. Под руководством Леонида Андреевича было проведено уникальное исследование на добровольцах по изучению метаболизма и способов защиты от радиоизотопов йода. В результате этих работ впервые в 1967 г. было разработано «Руководство по йодной профилактике в случае возникновения радиационных аварий».

В этот же период было разработано эффективное средство для защиты кожи от внешнего излучения – крем «Защита», который был принят к производству и многие годы с успехом использовалось в медицине, промышленности и при аварийных работах в условиях повышенного излучения, а так же были разработаны средства очищения организма от инкорпорированных радионуклидов – адсорбатор и ферроцин.



Доктор медицинских наук, профессор (1966), член-корреспондент АМН СССР (1974), академик АМН СССР (1978), академик РАН (2013), лауреат Ленинской премии (1985), Государственных премий СССР (1977) и РФ (2000), дважды лауреат премии Правительства РФ по науке и технике (2002, 2007), Герой Социалистического труда (1988)



В 1972 г. под редакцией Леонида Андреевича Ильина были изданы одни из первых монографий по защите от ионизирующего излучения: «Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности» (Ильин Л.А., Архангельская Г.В., Константинов Ю.О., Лихтарев И.А.) и «Радиоактивные вещества и кожа (метаболизм и дезактивация)» (Норец Т.А., Швыдко Н.С., Иванов Е.В., Ильин Л.А.)

В 1968 г., обобщив работы, проведенные в Институте, Леонид Андреевич защитил диссертацию на соискание степени доктора медицинских наук. За годы работы в Институте (с 1961 по 1968 г.) под руководством Л.А. Ильина 6 сотрудников подготовили и защитили кандидатские диссертации и 3 – докторские.

В 1968 г. Л.А. Ильин был назначен (в том числе и по рекомендации директора Института М.А. Невструевой) директором ордена Ленина Института биофизики МЗ СССР/РФ, которым он руководил в течение 40 лет.

За все время работы Леонид Андреевич был удостоен многих высших наград страны – орденами Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, орденом Октябрьской Революции, орденами Петра Великого I степени и Дмитрия Донского. В 2013 г. Л.А. Ильин стал лауреатом международной премии Андрея Первозванного «Вера и Верность» за выдающийся вклад в развитие отечественной науки, спасение человеческих жизней, многолетний труд в деле укрепления мира.

В честь 90-летия Леонида Андреевича Ильина был снят документальный фильм «Врач государства.

Леонид Ильин». В 2022 г. за заслуги в развитии здравоохранения и многолетнюю добросовестную работу Леонид Андреевич был награжден орденом Александра Невского, который лично вручал ему в Кремле Президент Российской Федерации В.В. Путин.

Мы гордимся, что Леонид Андреевич был сотрудником нашего Института, что именно в наших стенах под его руководством были проведены важнейшие исследования, которые легли в фундамент отечественной радиационной гигиены, заложили основы радиационной безопасности работ в атомной отрасли и других сферах жизни.

Уход из жизни такого ученого и человека, как Л.А. Ильин, – большая невосполнимая потеря не только для его учеников, коллег, друзей, но и для всей нашей страны. Память о Леониде Андреевиче навсегда останется в наших сердцах.

*Коллектив сотрудников Санкт-Петербургского
научно-исследовательского института радиационной
гигиены им. П.В. Рамзаева*

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 A4 шрифтом Times New Roman кеглем 14, с межстрочным ин-

тервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева – 2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

СТРУКТУРА СТАТЬИ

Титульный лист должен содержать:

- **название статьи** должно кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В него необходимо вложить как информативность, так и привлекательность, уникальность научного творчества автора. Не допускается использование сокращений и аббревиатур, а также торговых (коммерческих) названий приборов, медицинской аппаратуры и т.п.);

Приводится на русском и английском языках.

- **фамилия и инициалы автора(ов);**

- любые изменения в списке авторов после подачи статьи в редакцию должны быть одобрены всеми авторами.

Фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru.

- **наименование учреждений**, в которых работают авторы с указанием ведомственной принадлежности (Роспотребнадзор, Минздрав России, РАМН и т.п.), город, страна (при этом префиксы учреждений, указывающие на форму собственности, статус организации (ГУ ВПО, ФГБУ, ФБУН и т.д.) не указываются);

- рядом с фамилией автора(ов) и названием учреждения цифрами в верхнем регистре обозначается, в каком учреждении работает каждый из авторов. Если все авторы работают в одном учреждении, указывать место работы каждого автора отдельно не нужно;

- вся информация предоставляется на русском и английском языках. **Указывается официально принятый английский вариант наименования организаций!**

- **Резюме.** После титульного листа размещается резюме статьи на русском и английском языках (объемом не менее 250 слов каждая). Резюме выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В резюме следует излагать только релевантную информацию.

В нем должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 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 информа-

ции 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 раскрывает 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 вариативности 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, диаграмм или таблиц в тексте обязательно должны быть ссылки. 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., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007. М., 2007. С. 50-51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научно-го 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., Союкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубли. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванькович 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. Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

Примеры:

Статья 1-6 авторов

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

Errami M, Garner H. A tale of two citations. Nature. 2008;451(7177): 397-399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. Chronicle of Higher Education. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

Статья в электронном журнале с DOI:

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanagan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. 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 long term behaviour in rock mechanics: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9–12 May 2006, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211–216.

Стандарт

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Structural fire design. London: BSI; 2005.

Методические рекомендации/руководство

National Institute for Health and Care Excellence (NICE), Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-1837390683589> [Accessed 27 May 2017].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

После 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** издателю.

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 (титальный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате Tiff, JPEG с разрешением 300 dpi. При отправке файла обязательно указывайте номер рисунка, соответствующий его номеру в статье.

3. Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения издателю. Электронный вариант заполненного и подписанного всеми авторами договора следует отправить в качестве дополнительного файла в формате .pdf.

4. Официальное направление учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы в формате .pdf.

5. Экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи в формате .pdf.

ДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ В СЛУЧАЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАГИАТА, ФАБРИКАЦИИ И ФАЛЬСИФИКАЦИИ ДАННЫХ

В случае обнаружения недобросовестного поведения со стороны автора, плагиата, фабрикаций или фальсификации данных редакция руководствуется правилами COPE. Под недобросовестным поведением мы понимаем любые действия ученого, включающие ненадлежащее обращение с объектами изучения или намеренное манипулирование научной информацией, при котором она перестает отражать наблюдаемые исследования; а также поведение ученого, которое не соответствует принятым этическим и научным стандартам.

К недобросовестному поведению журнал «Радиационная гигиена» не относит честные ошибки или честные расхождения в плане, проведении, интерпретации или оценке 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)23353-63, 2334283.