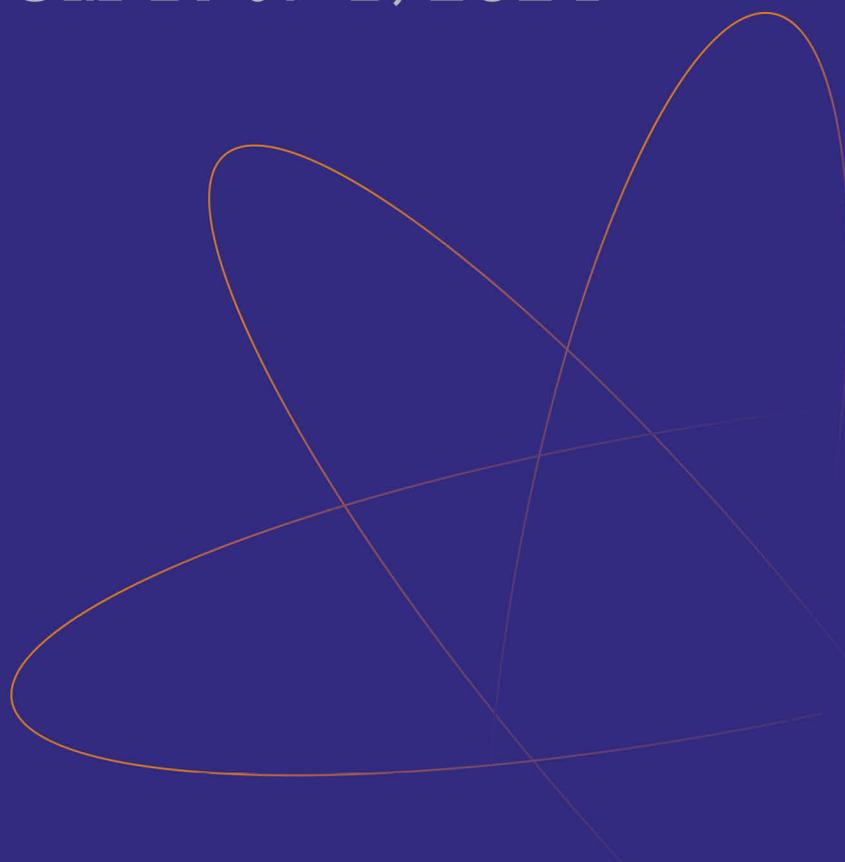


ISSN 1998-426X (print)
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 17 № 1, 2024



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

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

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

Задачи журнала:

- 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. Плаксина
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 20.03.2024
Формат 60x84/8. Печать офсетная. 17 печ.л.

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

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

Научно-практический журнал

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

Издается ежеквартально.

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

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

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



Том 17 № 1, 2024

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)

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 радиологии 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@niirg.ru
Web: www.radhyg.ru

The journal is distributed by subscription
Index for subscription in the agency
“Book-Service” - F57988.
The cost of annual subscription - 3920 rubles.

RADIATION HYGIENE

Quarterly peer-reviewed scientific and practical journal

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

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

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



Chairman of Editorial Council

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Members of Editorial Council

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

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

Roman V. Buzinov – Federal Budgetary Scientific Facility “North-West Public Health Research Center”, 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)

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. Vodovotov – 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)

Vasilii 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 17 № 1, 2024

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Водоватов А.В., Шацкий И.Г.
Характеристика радиационного риска от рентгеноскопических исследований путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни7
- Буртова Е.Ю.
Психическое здоровье жителей радиоактивно загрязненных территорий Челябинской области в отдаленном периоде после отселения18
- Соколова А.Б., Ефимов А.В., Джунушалиев А.Б.
Оценка применимости специальной модели поведения плутония в присутствии хелатов в случаях раннего поступления промышленных соединений плутония работникам ФГУП «ПО «Маяк»»25
- Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А.
Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 3: Принципы планирования радонометрических обследований34
- Петрякова А.В., Чипига Л.А., Андреев Г.И., Громова Е.А., Катаева Г.В., Ковалев К.В., Онищенко С.С., Безумова Е.В.
Гармонизация количественной оценки между ПЭТ/КТ-аппаратами разных поколений: Biograph mCT и Biograph Vision44
- Барковский А.Н., Рамзаев В.П.
Современный статус референтной локации в базовой модели оценки доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненной территории после Чернобыльской аварии54
- Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Толстых Е.И.
Влияние изменчивости морфометрических параметров костей человека на неопределенность доз внутреннего облучения костного мозга от ⁹⁰Sr60
- Кобылянский В.И., Четчикова О.Б.
Оценка микросфер альбумина для радиоаэрозольного исследования отложения ингалированных веществ и мукоцилиарного клиренса69
- Силкин С.С., Крестинина Л.Ю.
Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте населения, облученного в возрасте до 20 лет76

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Рамзаев В.П., Барковский А.Н.
Опыт применения портативного гамма-спектрометра MKS AT6101D для измерения *in situ* плотности загрязнения почвы цезием-137 в Брянской области России86

ОБЗОРЫ

- Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Петрякова А.В., Библин А.М., Горский Г.А.
Радиационные аварии в лучевой и радионуклидной диагностике и терапии: сравнение российских и международных подходов к терминологии и классификации97

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

- Зозуль Ю.Н., Киселёв С.М., Шлыгин В.В., Ахромеев С.В., Малахова А.Н., Гимадова Т.И., Бельских Ю.С., Арчакова Ю.В., Галицкая Л.Н.
Радиационно-гигиеническая обстановка в районе размещения хранилищ отходов сублиматного производства АО «АЭХК»111

CONTENTS

Vol. 17 № 1, 2024

RESEARCH ARTICLES

- Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Vodovatov A.V., Shatskiy I.G.
Using disability-adjusted life years measure for characterization of radiation risk from fluoroscopy15
- Burtovaia E.Yu.
Mental health of residents of radioactively contaminated territories of the Chelyabinsk region in the late period after the resettlement23
- Sokolova A.B., Efimov A.V., Dzhunushaliev A.B.
Assessing the applicability of a special model of plutonium behavior in presence of chelates in cases of wound intake of industrial compounds of plutonium in the FSUE Mayak PA workers31
- Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V., Saprykin K.A.
Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 3: Approaches to radon survey planning42
- Petryakova A.V., Chipiga L.A., Andreev G.I., Gromova E.A., Kataeva G.V., Kovalev K.V., Onischenko S.S., Bezumova E.V.
Harmonisation of quantitative assessment between different generation of PET/CT: Biograph mCT and Biograph Vision51
- Barkovsky A.N., Ramzaev V.P.
Current status of reference location in the basic model for assessment of external radiation doses to the population living in radioactively contaminated areas after the Chernobyl accident58
- Shishkina E.A., Sharagin P.A., Tolstykh E.I.
Effect of variability of human bone morphometric parameters on the uncertainty of internal bone marrow doses due to ⁹⁰Sr67
- Kobylyansky V.I., Chechetkina O.B.
Evaluation of the possibilities of using albumin microspheres for radioaerosol study of the deposition of inhaled substances and mucociliary clearance74
- Silkin S.S., Krestinina L.Yu.
Solid cancer mortality risk in the cohort of Urals population exposed to radiation for up the age of 2084

RADIATION MEASUREMENT

- Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.
Experience of using the portable gamma spectrometer MKS AT6101D for *in situ* measurements of the density of ¹³⁷Cs soil contamination in the Bryansk region of Russia86

REVIEWS

- Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Petryakova A.V., Biblin A.M., Gorsky G.A.
Radiation accidents in X-ray and radionuclide diagnostics and therapy: comparison of Russian and international approaches to the terminology and classification108

RADIATION SAFETY DURING DECOMMISSIONING OF NUCLEAR LEGACY SITES

- Zozul Yul.N., Kiselev S.M., Shlygin V.V., Akhromeev S.V., Malakhova A.N., Gimadova T.I., Belskikh Yu.S., Archakova Yu.V., Galitskaya L.N.
Radiation-hygienic situation in the area of sublimate production waste storage of JSC "AECC"119

СОДЕРЖАНИЕ

Том 17 № 1, 2024

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

**Современное радиационно-гигиеническое состояние
территорий проведения мирных ядерных взрывов
«Глобус-4» и «Горизонт-1» в Республике Коми..... 121**

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 131**

CONTENTS

Vol. 17 № 1, 2024

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

**Modern radiation-hygienic state of the territories
of the Globus-4 and Gorizont-1 peaceful nuclear explosions
in the Komi Republic 129**

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS..... 131**

Характеристика радиационного риска от рентгеноскопических исследований путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни

Л.В. Репин¹, Р.Р. Ахматдинов¹, А.М. Библин¹, А.В. Водоватов^{1,2}, И.Г. Шацкий¹

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

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

Проведение медицинских диагностических исследований, связанных с использованием ионизирующего излучения, является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в медицинской диагностике. При этом медицинское облучение пациентов имеет ряд принципиальных отличий от других повседневных ситуаций планируемого облучения. Медицинское облучение, как правило, носит острый характер, а дозы облучения для большинства рентгенодиагностических исследований превосходят уровень природного и техногенного облучения, связанного с нормальной эксплуатацией радиационных объектов. В такой ситуации важное значение приобретает дифференциация рисков с учетом различной радиочувствительности отдельных половозрастных групп пациентов. Радиационные риски должны учитываться как при назначении исследований, связанных с использованием ионизирующего излучения, так и при анализе соотношения польза – вред в связи с их проведением конкретным пациентам. Еще одна причина, по которой оценка рисков является актуальной задачей, – необходимость информирования пациентов и/или их законных представителей о рисках для здоровья, связанных с проведением исследования, в том числе рисках радиационных. В рамках настоящей работы были оценены риски, связанные с проведением 3 видов рентгеноскопических исследований: рентгеноскопия пищевода, рентгеноскопия желудка, ирригоскопия. При этом для характеристики риска использовался все более часто применяемый при оценке рисков показатель DALY, отражающий возможное число потерянных лет здоровой жизни вследствие радиационного воздействия при проведении исследования. Цель работы заключалась в расчете значений показателя DALY для различных половозрастных групп пациентов из российской популяции при проведении рентгеноскопических исследований. Для достижения указанной цели применялся метод оценки числа потерянных вследствие воздействия ионизирующих излучений лет здоровой жизни. В статье представлены результаты расчета значений показателя DALY для 3 видов рентгеноскопических исследований. Анализ полученных результатов показал, что вклад онкологических заболеваний в суммарный радиационный вред у мужчин старших возрастов существенно выше, чем у женщин, а вклад несмертельных заболеваний в DALY у женщин составляет около 10%, незначительно увеличиваясь с возрастом. Данная работа представляет собой очередной шаг в направлении гармонизации методологии оценки радиационного риска с методологиями оценки рисков иной природы. Одним из направлений использования результатов расчета является разработка методических подходов к расчету поло- и возраст-зависимых показателей риска, связанного с медицинским облучением пациентов.

Ключевые слова: радиационный риск, эффективная доза, DALY, медицинское облучение, рентгеноскопия, потерянные годы здоровой жизни.

Введение

Характеристика рисков – завершающий этап в классической схеме оценки рисков для здоровья, связанного с воздействием вредных факторов среды обитания, на-

ряду с идентификацией опасности, оценкой зависимости доза/эффект и оценкой экспозиции воздействия вредного фактора. На этом этапе «синтезируются» данные, полученные на предшествующих этапах исследований,

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: leonid_repin@mail.ru

проводится расчет и ранжирование рисков, источников их образования, воздействующих сред и путей поступления»¹. Применительно к радиационным рискам для здоровья зачастую под оценкой рисков подразумевают именно характеристику риска. При этом для решения задач по управлению риском в области воздействия малых доз ионизирующего излучения (далее — ИИ) в качестве единицы количественной оценки риска чаще всего используют величину радиационного ущерба, а в качестве меры риска – величины эффективной и/или эквивалентной доз облучения. Подобный подход, несомненно, оправдан при управлении рисками в диапазоне очень малых доз² для населения в целом или даже несколько более высоких доз для взрослого населения, особенно при условии сравнительно равномерного распределения облучения во времени, т.е. в ситуациях пролонгированного и/или фракционированного облучения. К таким ситуациям относятся природное облучение, техногенное облучение за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов, профессиональное облучение персонала радиационных объектов и некоторые другие. Несколько иначе обстоит дело в ситуации с медицинским облучением пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований (далее — РРИ). В этом случае облучение, как правило, носит острый характер, а облучение при некоторых видах РРИ выходит за рамки диапазона очень малых доз.

Дискуссия о границах применимости эффективной дозы в качестве меры риска при медицинском облучении пациентов ведется не один год, и всё большее число авторов склоняются к тому, что для управления радиационными рисками при медицинском облучении пациентов лучше пользоваться измеримыми величинами и/или значениями органных доз [2–5]. Однако указанные величины не позволяют в сопоставимых единицах оценить ожидаемую пользу от проведения исследования или сопоставить пользу и вред от него.

Поскольку радиационные риски, связанные с некоторыми видами РРИ, для ряда половозрастных групп пациентов превышают уровень пренебрежимо малого риска³, методы половозрастной дифференциации рисков, т.е. оценки рисков для различных по половозрастному составу групп пациентов, заслуживают особого внимания. Различие в уровне рисков при проведении одинаковых

исследований связано с существенно большей радиочувствительностью детей по сравнению со взрослыми и женщин по сравнению с мужчинами во множестве ситуаций облучения [6].

Основными отдаленными негативными последствиями воздействия ИИ на здоровье человека считаются злокачественные новообразования (ЗНО), поэтому в качестве единицы измерения ущерба для здоровья при характеристике радиационных рисков используются показатели, характеризующие онкологическую смертность. Для более полной характеристики в состав таких показателей могут включаться также онкологические заболевания, не приводящие к смерти, наследственные эффекты и другие заболевания. При этом все остальные виды негативных последствий (помимо смертельных ЗНО) приравниваются к показателям онкологической смертности путем присваивания соответствующих взвешивающих множителей (весовых коэффициентов).

Примерами таких показателей являются радиационный ущерб [7] или «пожизненный риск смерти с учетом вреда для здоровья от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания», используемый в МР 2.6.1.0215–20⁴. Платой за практическое удобство и простоту обобщенных показателей вреда является неопределенность оценки, при которой равными считаются риски, отличающиеся не только кратно, но иногда даже более чем на порядок величины [8].

По мере развития методологии оценки радиационных рисков вопрос о недостаточной информативности и сложности для понимания используемых показателей радиационного риска вновь приобрел актуальность. Альтернативный подход к выбору показателя популяционного здоровья, пригодного для использования в качестве меры риска, стал возможен благодаря развитию проекта ВОЗ «Глобальное бремя болезней» [9], стартовавшего более 30 лет назад. Указанный подход уже был использован нами при оценке радиационных рисков, связанных с медицинским облучением. В качестве показателя радиационного вреда, связанного с проведением компьютерно-томографических исследований пациентам различного пола и возраста, в [10] нами был использован показатель DALY⁵, т.е. число потерянных вследствие облучения лет здоровой полноценной жизни. Показатель DALY широко

¹ Руководство Р 2.1.10.3968-23 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду». Утверждено Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 06.09.2023 г. [Guidelines R 2.1.10.3968-23 “Guidelines for assessment of public health risk from exposure to chemicals polluting the environment”. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 06.09.2023. (In Russ.)]

² НКДАР ООН определяет дозы облучения с низкой ЛПЭ в диапазоне 10–100 мГр как малые, а дозы менее 10 мГр как очень малые (very low doses – англ.) [UNSCEAR defines doses with low LET in the range 10–100 mGy as low and doses less than 10 mGy as very low] [1].

³ В соответствии с классификацией рисков, приведенной в МР 2.6.1.0215–20 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований», радиационные риски, не превышающие 1×10^{-6} (т.е. менее 1 случая на 1 млн человек), относятся к категории «Пренебрежимо малый риск». [According to the classification of risks given in Guidelines MR 2.6.1.0215–20 “Assessment of radiation risk of patients during radiological examinations”, radiation risks not exceeding 1×10^{-6} (i.e., less than one case per million people) are categorised as “negligibly risk”.]

⁴ МР 2.6.1.0215–20 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований». Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 21.09.2020 г. (далее – МР 2.6.1.0215–20). [Guidelines MR 2.6.1.0215–20 “Assessment of radiation risk of patients during radiological examinations”. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 21.09.2020 (hereinafter – MR 2.6.1.0215–20). (In Russ.)]

⁵ Disability-adjusted life years – годы жизни с поправкой на нетрудоспособность (англ.)

используется в области организации здравоохранения и находит все более широкое применение в оценке рисков⁶ [11–13] в качестве меры вреда от воздействия вредных или опасных факторов среды обитания на здоровье населения, в том числе в Российской Федерации⁶. Сфера применения данного показателя простирается от оценки влияния на систему здравоохранения онкологических и инфекционных заболеваний до оценки статистики дорожно-транспортных происшествий [21–23].

К основным преимуществам использования показателя DALY в качестве интегрального показателя популяционного здоровья по сравнению с более привычными показателями заболеваемости и смертности можно отнести то, что единицей измерения DALY является год здоровой жизни человека, т.е. время, что является более универсальной единицей, чем потерянная человеческая жизнь. Использование времени в качестве меры вреда для популяционного здоровья позволяет напрямую сопоставлять риски, по-разному распределенные во времени. Например, риск возникновения хронических заболеваний и риск мгновенной смерти от производственного травматизма.

Цель исследования – расчет значений показателя радиогенного⁷ DALY, связанного с проведением рентгеноскопических (далее – РС) исследований для различных половозрастных групп пациентов из российской популяции.

Задачи исследования

1. Определить виды РС исследований и соответствующие половозрастные группы для расчета показателей радиационного риска.
2. Рассчитать значения радиогенного DALY на основании органных доз, получаемых пациентами при проведении РС исследований.
3. Провести анализ структуры радиогенного DALY пациентов различного пола и возраста с учетом вклада числа лет, потерянных вследствие преждевременной смерти от вызванного облучением ЗНО, и взвешенного по степени тяжести заболевания числа лет, прожитых в состоянии неполного здоровья.

Материалы и методы

Для расчета значений показателей радиационного риска использовалась модель, описанная в Публикации 152 МКРЗ [7]. Расчеты осуществлялись с использованием органных доз для 3 видов рентгеноскопических

исследований: рентгеноскопия пищевода, рентгеноскопия желудка, ирригоскопия. Органные дозы были рассчитаны с использованием программного обеспечения РСХМС 2.0 [14] на основе протоколов рентгеноскопических исследований, собранных специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в больницах Санкт-Петербурга в 2015–2018 гг. [15, 16]. Риски возникновения радиогенных ЗНО рассчитывались по моделям абсолютного и относительного риска для мужчин и женщин. В расчетах использовались дозы на следующие органы/ткани для мужчин и женщин: пищевод, желудок, толстая кишка, печень, легкие, мочевой пузырь, щитовидная железа, красный костный мозг. Для женщин дополнительно оценивались риски возникновения ЗНО яичников и молочной железы. Для мужчин и женщин отдельно оценивался риск возникновения ЗНО в категории «Другие солидные» путем усреднения органных доз на 13 органов в соответствии с рекомендациями Публикации 103 МКРЗ [6].

Средние значения органных доз, использованные при оценке радиационных рисков при проведении РС пищевода и ирригоскопии, были рассчитаны для 4 возрастных групп пациентов: 0–4 года, 5–9 лет, 10–14 лет и «Взрослые». Для РС желудка младшая возрастная группа была разбита на 3 диапазона: до 1 года, от 1 до 2 лет и от 2 до 5 лет. Выделение в младшей возрастной группе аналогичных диапазонов для двух других видов исследований не проводилось в связи с тем, что рентгеноскопии пищевода и ирригоскопии крайне редко проводились в качестве самостоятельных исследований.

Межпопуляционный перенос риска на российскую популяцию осуществлялся с использованием медико-демографических данных за 2018 г. [17].

Расчет значений DALY был выполнен в соответствии с методикой, описанной в работе Shimada и Kai [11], однако в расчете использованы значения наблюдаемой и относительной пятилетней выживаемости для российской популяции [18] вместо приведенных в статье данных по японской популяции. Показатель DALY представляет собой сумму числа лет, потерянных вследствие преждевременной смерти по причине конкретного заболевания и числа лет, прожитых в состоянии ухудшившегося по причине заболевания здоровья (формула 1).

$$DALY=YLL+YLD, \quad (1)$$

где YLL⁸ – число лет, потерянных вследствие преждевременной смерти;

YLD⁹ – взвешенное число лет, прожитых в состоянии неполного здоровья. При этом годам жизни, прожитым

⁶ Руководство Р 2.2.3969-23 «Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки». Утверждено Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 07.09.2023 г. [Guidelines R 2.1.10.3968-23 “Guidelines on occupational risk assessment for workers’ health. Organizational and methodological aspects, principles and criteria”. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 07.09.2023. (In Russ.)]

⁷ Проведение медицинских ППИ сопряжено с риском не только радиационной природы, но и с иными видами риска, включая ошибки персонала, реакцию на препараты и т.п. В настоящей статье под радиогенным DALY подразумеваются значения показателя DALY, рассчитанные только для радиационного риска, возникающего при штатном проведении ППИ. [Performing X-ray examinations involves risks not only of a radiological nature, but also other types of risk, including personnel errors, drug reactions, etc. In this article, “radiogenic DALY” refers to DALY values calculated only for radiation risk arising from routine X-ray examinations.]

⁸ Years of Life Lost – потерянные годы жизни (англ.)

⁹ Years Lived with Disability – годы, прожитые с нетрудоспособностью (заболеванием) (англ.)

в состоянии неполного здоровья, присваиваются различные веса от 0 до 1 в зависимости от тяжести заболевания.

Для расчета значений DALY применялась методика, включавшая в себя следующие основные этапы (более подробно методика описана в [10, 19]):

1. Расчет значений избыточной заболеваемости радиогенными ЗНО различной локализации в разных достигнутых возрастах в зависимости от органных доз, пола и возраста на момент проведения РС исследования по моделям абсолютного и относительного риска.

2. Расчет значений показателя DALY для лиц различного пола и возраста при проведении РС исследований на основании полученных оценок избыточной онкологической заболеваемости.

3. Расчет групповых (популяционных) рисков, взвешенных с учетом вклада отдельных половозрастных групп в структуру населения Российской Федерации.

4. Взвешивание оценок DALY, полученных по моделям абсолютного и относительного риска, с использованием взвешивающих коэффициентов, рекомендованных МКРЗ [6].

Расчеты были выполнены с использованием специально разработанной программы на языке Wolfram [17].

Значения DALY рассчитывались отдельно для пациентов из различных половозрастных групп на момент проведения исследований. В результате выполнения расчетов были получены значения радиогенных DALY для 32 половозрастных групп пациентов (по 16 возрастных групп пациентов мужского и женского пола) при выполнении РС пищевода и ирригоскопии, а также для 36 половозрастных групп пациентов (по 18 возрастных групп пациентов мужского и женского пола) при выполнении РС желудка.

Результаты и обсуждение

В таблице представлены округленные до целого числа лет значения DALY, связанные с воздействием ИИ, при выполнении рентгеноскопических исследований для мужчин и женщин российской популяции в расчете на 10 000 пациентов. Для справки приводятся соответствующие средние значения эффективной дозы для гермафродитного фантома, соответствующего возрастной группе, приведенные в МР 2.6.1.0215–20. Для взрослых пациен-

Таблица
[Table]

Значения DALY от воздействия ИИ на 10 000 пациентов при выполнении рентгеноскопических исследований
[DALY values from exposure to ionizing radiation per 10,000 patients for fluoroscopic examinations]

Возраст при облучении, лет [Age at exposure, years]	Вид рентгеноскопического исследования [Type of fluoroscopic examination]								
	Рентгеноскопия пищевода [Esophageal fluoroscopy]			Рентгеноскопия желудка [Stomach fluoroscopy]			Ирригоскопия [Irrigoscopy]		
	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv]	DALY на 10 000 пациентов, лет [DALY per 10 000 patients, year]		Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv]	DALY на 10 000 пациентов, лет [DALY per 10 000 patients, year]		Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv]	DALY на 10 000 пациентов, лет [DALY per 10 000 patients, year]	
		Мужчины [Males]	Женщины [Females]		Мужчины [Males]	Женщины [Females]		Мужчины [Males]	Женщины [Females]
0			1,3	9	23				
1			1,2	10	21				
5	0,7	3	11	0,7	4	13	0,8	6	7
10	1,3	6	19	1,2	6	16	0,8	5	6
15	1,1	5	13	1,4	7	18	0,7	3	4
20		10	20		46	73		21	22
25		8	17		39	63		18	20
30		8	15		34	54		16	18
35		7	12		29	46		14	16
40		6	10		25	38		13	13
45		5	9		21	31		11	11
50	2,1	4	7	7,5	17	25	6,9	9	9
55		4	6		13	19		7	8
60		3	4		9	15		6	6
65		2	3		6	10		4	4
70		1	2		3	6		2	3
75		0	1		1	3		1	2
80		0	0		0	1		0	1

тов приведено одно значение эффективной дозы для всех возрастных групп.

Из представленных в таблице данных видно, что, начиная с возраста 20 лет, значение DALY для всех исследований убывает. Это связано с убыванием функции дожития с возрастом. В детском и подростковом возрасте значения DALY зависят в первую очередь от параметров проведения исследований и от анатомических параметров организма детей и подростков, что приводит к существенному различию получаемых в ходе проведения исследований органных доз и, как следствие, может приводить к колебаниям значений DALY при различных видах исследований (рис. 1).

Следует отметить, что, хотя на рисунке 1 графики выглядят как графики непрерывных функций, это не свидетельствует о плавном и непрерывном повышении риска между возрастными 15 и 20 лет. Данный «скачок» отражает только факт изменения параметров проведения исследований у взрослых пациентов, начиная с возраста 18 лет, по сравнению с аналогичными исследованиями у детей и подростков. Колебания же оценок в детских возрастах связаны, по-видимому, с небольшим объемом выборки и, как следствие, с существенными неопределенностями в оценке органных доз. Анализ неопределенностей оценки полученных значений DALY на данном этапе исследований не производился.

В [10] была отмечена высокая степень согласованности половозрастного распределения рисков при использовании DALY и риска смерти с учетом вреда от снижения качества жизни, приведенного в МР 2.6.1.0215–20. В настоящей работе было изучено изменение вклада несмертельных ЗНО в суммарное значение DALY в зависимости от пола и возраста пациентов. При расчете радиационного ущерба по методике МКРЗ [7] степень тяжести несмертельных онкологических заболеваний принимается не зависящей от возраста, а суммарный вклад несмертельных заболеваний в радиационный ущерб составляет порядка 10%. Несмотря на существенное отличие в методиках оценки тяжести несмертельных заболеваний, используемых при расчете радиационного ущерба и показателя DALY (а конкретно показателя YLD, отражающего число лет, прожитых в состоянии неполного здоровья, взвешенных по степени тяжести заболеваний), вклад несмертель-

ных заболеваний в DALY у женщин составляет около 10%, незначительно увеличиваясь к старшим возрастам. На рисунке 2 показано соотношение абсолютного и относительного вклада YLL и YLD в значение радиогенного DALY при выполнении рентгеноскопических исследований у женщин различного возраста.

Для мужчин пожилого возраста в российской популяции ситуация несколько отличается. Как показано на рисунке 3, для мужчин старше 70 лет вклад несмертельных ЗНО в суммарный вред для здоровья резко возрастает. Это связано с более короткой продолжительностью жизни мужчин российской популяции по сравнению с женщинами.

Полученные в ходе выполнения исследования результаты показывают, что не только возрастное распределение рисков, оцененное с помощью показателя DALY, но и соотношение вклада смертельных и несмертельных онкологических заболеваний в суммарный вред для здоровья хорошо согласуются с оценками на основе показателей смертности с учетом вреда от снижения качества жизни. При этом использование DALY дает важную дополнительную информацию о структуре радиационных рисков, связанных с медицинским облучением, особенно в старших возрастах.

Заключение

Необходимость гармонизации методологии оценки радиационных рисков с методологиями оценки рисков иной природы является актуальной прикладной задачей последних десятилетий, и представленная работа является одной из попыток практического применения показателя DALY в оценке радиационных рисков, связанных с медицинским облучением пациентов. При выполнении настоящей работы были рассчитаны значения радиогенного DALY, связанного с проведением 3 видов РС-исследований, для нескольких половозрастных групп пациентов российской популяции.

Было установлено, что вклад несмертельных онкологических заболеваний в значение DALY составляет порядка 10–15% при возрасте пациентов не старше 65 лет, увеличиваясь до 20% к 80 годам у женщин и до 100% у мужчин.

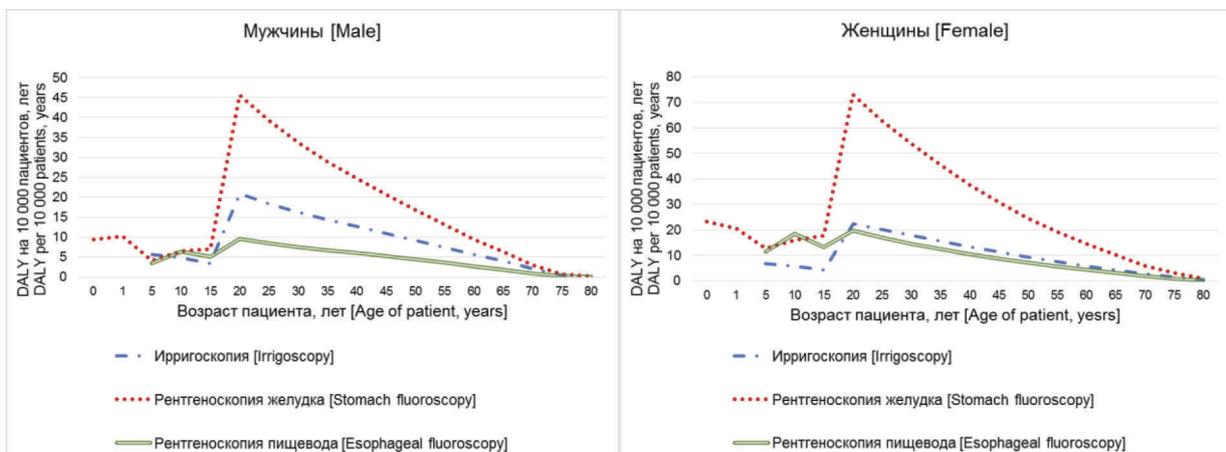


Рис. 1. Зависимость значений радиогенного DALY от возраста пациентов при проведении рентгеноскопических исследований в Российской Федерации

[Fig. 1. Dependence of radiogenic DALY values on the age of patients during fluoroscopic examinations in the Russian Federation]

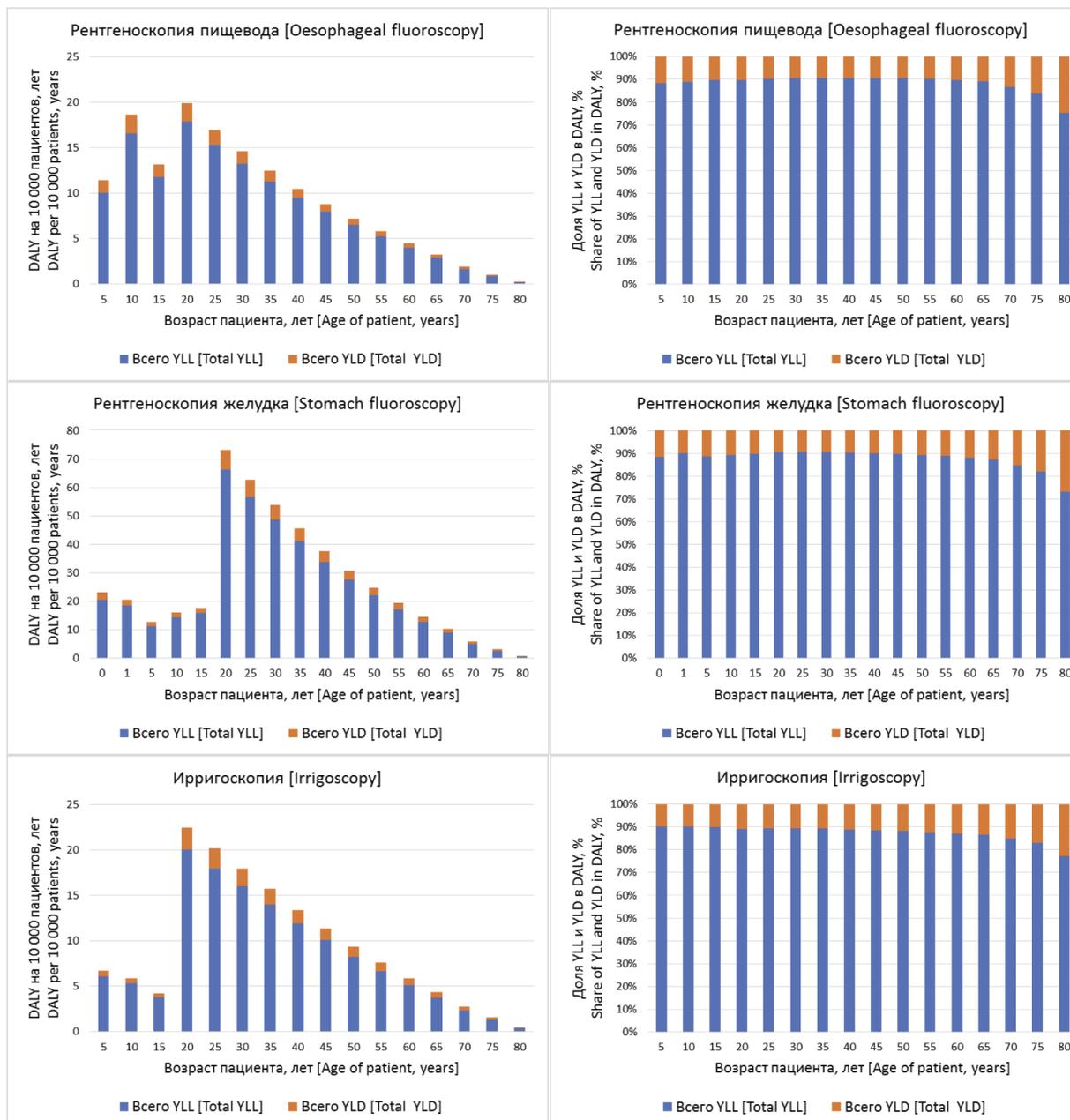


Рис. 2. Абсолютный (левый столбец) и относительный (правый столбец) вклад YLL и YLD в значение радиогенных DALY у женщин российской популяции при проведении рентгеноскопических исследований в различных возрастах
[Fig. 2. Absolute (left column) and relative (right column) contribution of YLL and YLD to the value of radiogenic DALY in women of the Russian population during fluoroscopic examinations at different ages]

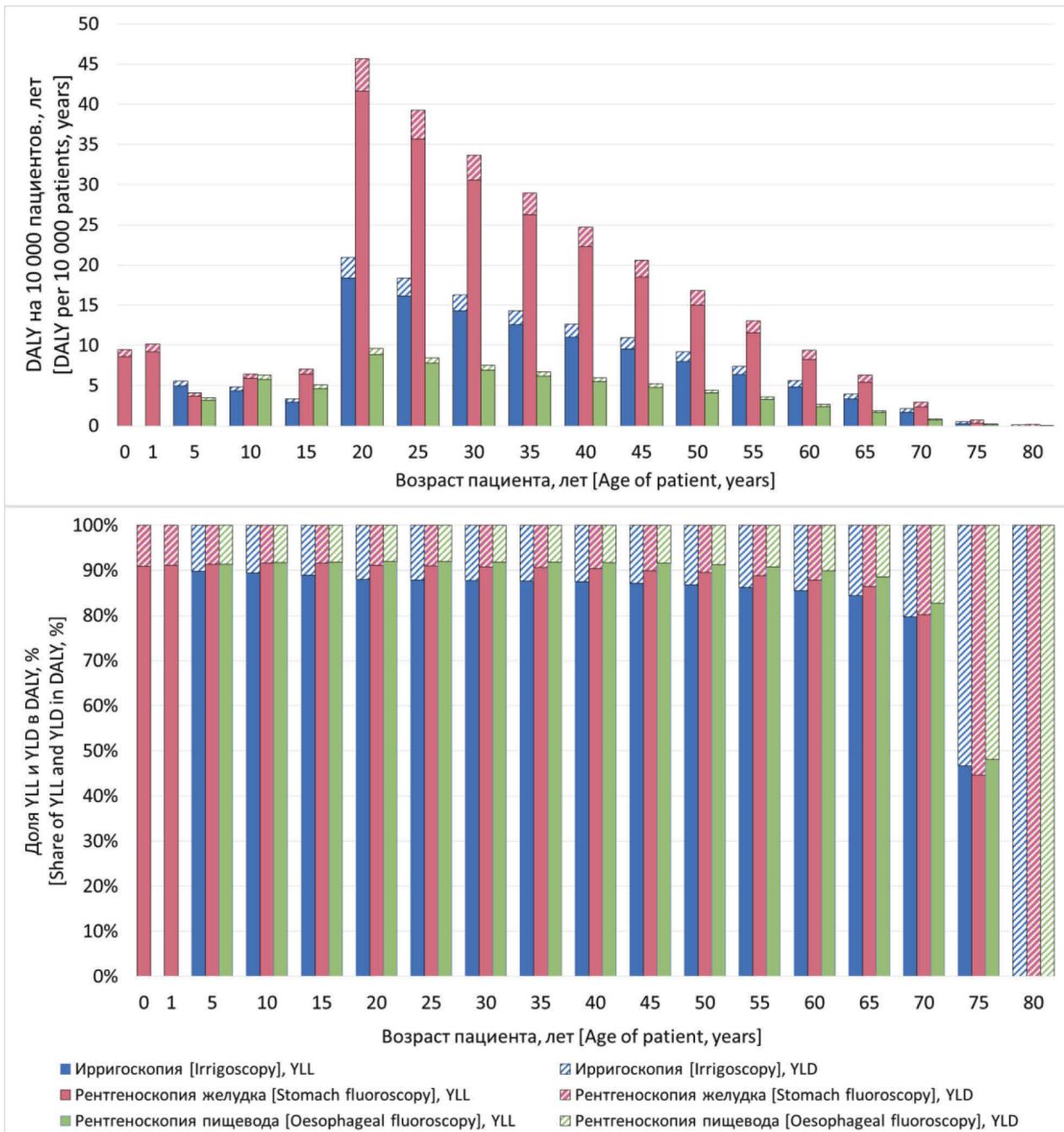


Рис. 3. Соотношение абсолютного (сверху) и относительного (снизу) вклада YLL и YLD в суммарное значение DALY у мужчин российской популяции при проведении рентгеноскопии в различных возрастах
[Fig 3. Ratio of absolute (top) and relative (bottom) contribution of YLL and YLD to the total DALY value in the Russian male population during fluoroscopy at different ages]

Дальнейшее развитие методологии предполагает анализ возможности использования показателя DALY в качестве меры сопоставления пользы и вреда при медицинской лучевой и радионуклидной диагностике. Практическое применение показателя радиогенного DALY целесообразно при сравнительном анализе радиационных и нерадиационных рисков, связанных с проведением медицинских РПИ.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин Л.В. – разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, осуществлял расчеты значений показателя радиационного ущерба, написал черновик рукописи.
 Ахматдинов Р.Р. – провел поиск и анализ литературных данных, создал иллюстрации, редактировал промежуточный вариант рукописи.

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

Водоватов А.В. – провел анализ доз облучения при рентгеноскопических исследованиях, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Шацкий И.Г. – провел анализ доз облучения при рентгеноскопических исследованиях.

Информация о конфликте интересов

Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

- Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume III. Scientific Annex C. Biological Mechanisms Relevant for the Inference of Cancer Risks from Low-Dose And Low-Dose-Rate Radiation. New York: United Nations, 2021. 238 p.
- Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147 // *Annals of the ICRP*. 2021. Vol. 50, No 1. P. 103.
- Harrison J., Haylock R., Jansen J.T.M., et al. Effective doses and risks from medical diagnostic x-ray examinations for male and female patients from childhood to old age // *Journal of Radiological Protection*. 2023. Vol. 43, № 1. P. 011518. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/acbda7>.
- Андерссон М., Эккерман К., Павел Д. и др. Улучшенные модели оценки радиационного риска для отдельных когорт пациентов в Швеции. // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 2. С. 44–54. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-44-54>.
- Mattsson S. Need for individual cancer risk estimates in x-ray and nuclear medicine imaging // *Radiation Protection Dosimetry*. 2016. Vol. 169, № 1-4. P. 11–16. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw034>.
- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // *Annals of the ICRP*. 2007. Vol. 37, No 2-4. P. 332.
- Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152 // *Annals of the ICRP*. 2022. Vol. 51, No 3. P. 103.
- Репин Л.В. Об использовании коэффициентов ущерба для количественной оценки последствий воздействия ионизирующего излучения // *Радиационная гигиена*. 2011. Т. 4, № 1. С. 35-37.
- Lopez A., Mathers C., Ezzati M., et al. Measuring the global burden of disease and risk factors, 1990–2001. In: *Global burden of disease and risk factors*. Oxford University Press, 2006. 476 p.
- 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>.
- Shimada K., Kai M. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, № 4. P. 763–775. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/4/763>.
- Kotre C.J. Comparing benefit and detriment from medical diagnostic radiation exposure using disability-adjusted life years: towards quantitative justification // *Journal of Radiological Protection*. 2023. Vol. 43, № 4. P. 041512. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad1159>.
- Vaillant L., Maitre M., Lafranque E., et al. Proposal of a quantitative approach integrating radioactive and chemical risks // *Radioprotection*. 2023. Vol. 58, №. 2. P. 147-155. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2023012>.
- Tapiovaara M., Siiskonen T. PCXMC: A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. 2nd Ed. STUK: Finalnd, 2008.
- Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Камышанская И.Г. и др. Определение коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе для рентгеноскопических исследований желудка с бариевым контрастом для взрослых пациентов // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 1. С. 93-100. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-1-93-100>.
- Vodovатов 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. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab059>.
- Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019. 250 с.
- Состояние онкологической помощи населению России в 2019 году / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2020. 239 с.
- 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-2023-16-1-52-65>.
- 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. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-22-31>.
- Хайлова Ж.В., Каприн А.Д., Омельяновский В.В. и др. Анализ потерянных лет жизни в результате преждевременной смертности от злокачественных новообразований в Российской Федерации // *Сибирский онкологический журнал*. 2023. Т. 22, № 5. С. 14-27. DOI 10.21294/1814-4861-2023-22-5-14-2.
- Соколова О.В., Ушакова Т.Н., Зыкова Н.В. и др. Оценка экономического ущерба от клещевого вирусного энцефалита в Архангельской области с использованием показателя «Потерянные годы потенциальной жизни» // *Социальные аспекты здоровья населения*. 2023. Т. 69, № 3. С. 12. DOI: 10.21045/2071-5021-2023-69-3-12.
- Фаттахов Т.А., Пьянкова А.И. Потерянные годы жизни в результате дорожно-транспортных происшествий в России в 2000–2012 гг. // *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*. 2018. Т. 26, № 5. С. 271-275. DOI: <http://dx.doi.org/10.32687/0869-866X-2018-26-5-271-275>.

Поступила: 25.01.2024 г.

Репин Леонид Викторович – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт 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: leonid_repin@mail.ru

Ахматдинов Рустам Расимович – ведущий инженер-исследователь информационно-аналитического центра, 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
ORCID: 0000-0002-4151-5380

Библин Артем Михайлович – старший научный сотрудник, руководитель информационно-аналитического центра, 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
ORCID: 0000-0002-3139-2479

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, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-5191-7535

Шацкий Илья Геннадьевич – 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
ORCID: 0000-0003-2809-0223

Для цитирования: Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Водоватов А.В., Шацкий И.Г. Характеристика радиационного риска от рентгеноскопических исследований путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 7-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17

Using disability-adjusted life years measure for characterization of radiation risk from fluoroscopy

Leonid V. Repin¹, Rustam R. Akhmatdinov¹, Artem M. Biblin¹, Aleksandr V. Vodovatov^{1,2}, Ilya G. Shatskiy¹

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

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

Medical diagnostics procedures involving the use of ionising radiation is one of the most intensively developing areas in medical diagnostics. At the same time, medical exposure of patients has a number of fundamental differences from other routine situations of planned exposure. As a rule, medical exposure is acute, and radiation doses in some types of examinations exceed the level of natural and man-made exposure associated with normal operation of radiation facilities. In such a situation, risk differentiation is of great importance, taking into account the different radiosensitivity of individual sex and age groups of patients. Radiation risks should be taken into account both when prescribing examinations involving the use of ionising radiation and when analysing the benefit-harm ratio associated with their application to specific patients. Another reason why risk assessment is an urgent task is the need to inform patients and/or their legal representatives about the health risks associated with the carrying out of examinations, including radiation risks. Within the framework of the present work, the risks associated with fluoroscopic examinations were assessed. To characterise the risk we used the DALY indicator, which is more and more frequently used in risk assessment, reflecting the possible number of lost years of healthy life as a result of radiation exposure during the study. The aim of the work was to calculate DALY values for different sex and age groups of patients from the Russian population

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: leonid_repin@mail.ru

during fluoroscopic examinations. To achieve this aim, the method of estimating the number of healthy life years lost due to exposure to ionising radiation, which was developed in the course of the research work, was used. The paper presents the results of calculating DALY values for three types of fluoroscopic examinations. This work represents the next step in the direction of harmonisation of radiation risk assessment methodology with the methodologies of risk assessment of other nature. One of the directions of using the calculation results is the development of methodological approaches to the calculation of sex- and age-dependent risk coefficients associated with medical exposure of patients. The analysis of the obtained results showed that the contribution of oncological diseases to the total radiation harm in older men was significantly higher than in women.

Key words: radiation risk, effective dose, DALY, medical exposure, fluoroscopy, disability-adjusted life year.

Personal contribution of authors

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

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

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

Vodovatov A.V. analyzed radiation doses from fluoroscopy, edited the draft versions of the manuscript.

Shatskiy I.G. analyzed radiation doses from fluoroscopy

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Funding

The study was not supported by sponsorship. 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

- Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume III. Scientific Annex C. Biological Mechanisms Relevant for the Inference of Cancer Risks from Low-Dose And Low-Dose-Rate Radiation. New York: United Nations; 2021. 238 p.
- Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. *Annals of the ICRP*. 2021;50(1). 103.
- Harrison J, Haylock R, Jansen JTM, Zhang W, Wakeford R. Effective doses and risks from medical diagnostic x-ray examinations for male and female patients from childhood to old age. *Journal of Radiological Protection*. 2023;43(1): 011518. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/acbda7>.
- Andersson M, Eckerman K, Pawel D, Almen A, Mattsson S. Improved radiation risk models applied to different patient groups in Sweden. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 44–54. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-44-54>.
- Mattsson S. Need for individual cancer risk estimates in x-ray and nuclear medicine imaging. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169(1-4): 11–16. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw034>.
- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 332.
- Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152. *Annals of the ICRP*. 2022;51(3):103.
- Repin L.V. On the use of detriment parameters for the quantitative evaluation of radiation exposure consequences. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(1):35-37. (In Russian)
- Lopez A, Mathers C, Ezzati M, Jamison D, Murray C. Measuring the global burden of disease and risk factors, 1990–2001. In: Global burden of disease and risk factors. Oxford University Press; 2006. 476 p.
- 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>.
- Shimada K, Kai M. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 763–775. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/763.
- Kotre C.J. Comparing benefit and detriment from medical diagnostic radiation exposure using disability-adjusted life years: towards quantitative justification. *Journal of Radiological Protection*. 2023;43(4): 041512. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad1159>.
- Vaillant L, Maitre M, Lafranque E, Schneider T, Wasselin V. Proposal of a quantitative approach integrating radioactive and chemical risks. *Radioprotection*. 2023;58(2): 147–155 <https://doi.org/10.1051/radiopro/2023012>.
- Tapiovaara M, Siiskonen T. PCXMC: A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. 2nd Ed. STUK, Finalnd; 2008.
- Vodovatov AV, Golikov VV, Kamyshanskaya IG, Zinkevich KV, Bernhardsson Ch. Estimation of the conversion coefficients from dose-area product to effective dose for barium meal examinations for adult patients. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 93-100. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-1-93-100>.
- Vodovatov A, Golikov V, Kamyshanskaya I, Cheremysin V, Zinkevich K, Bernhardsson K. Estimation of the effective doses from typical fluoroscopic examinations with barium contrast. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;195(3-4): 264-272. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab059>.
- Malignant tumors in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Moscow; 2019. 250 p. (In Russian).
- Kaprin AD, Starinsky VV, Shakhzadova AO. The state of oncological care for the population of Russia in 2019. Moscow, 2020. (In Russian).
- 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>.
- Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Repin VS. Development of the Automated System for Radiation Risk Analysis: goals, tasks and the vision for progress. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 22-31. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-22-31>.

21. Khailova ZhV, Kaprin AD, Omelyanovsky VV, Pustovalov D, Agafonova YuA, Kusakina VO, et al. Analysis of years of life lost due to premature cancer mortality in the Russian Federation. *Sibirskiy onkologicheskiy zhurnal = Siberian journal of oncology*. 2023;22(5):14-27. (In Russian) <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2023-22-5-14-27>.
22. Sokolova OV, Ushakova TN, Zykova NV, Buzinov RV, Tokarevich NK. The assessment of economic damage from tick-borne encephalitis in the Arkhangelsk region based on Potential Years of Life Lost. *Social'nye aspekty zdorov'a naselenia [serial online] = Social Aspects of Population Health*. 2023;69(3): 12. (In Russian) <https://doi.org/10.21045/2071-5021-2023-69-3-12>.
23. Fattahov TA, Piankova AI. The years of life lost as a result of road traffic accidents in Russia in 2000—2012. *Problemi sotsialnoy gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny = Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine*. 2018;26(5): 271—275 (In Russian) <http://dx.doi.org/10.32687/0869-866X-2018-26-5-271-275>.

Received: January 25, 2024

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

ORCID 0000-0002-4857-6792

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

ORCID 0000-0002-4151-5380

Artem M. Biblin – senior research fellow, head of Information-analytical center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0002-3139-2479

Aleksandr V. Vodovатов – 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 Wellbeing, docent of the Department of General Hygiene, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0002-5191-7535

Ilya G. Shatskiy – research fellow, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0003-2809-0223

For citation: Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Vodovатов A.V., Shatskiy I.G. Using disability-adjusted life years measure for characterization of radiation risk from fluoroscopy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 31. P. 7-17. (In Russian). DOI: [10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17](https://doi.org/10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17)

Психическое здоровье жителей радиоактивно загрязненных территорий Челябинской области в отдаленном периоде после отселения

Е.Ю. Буртовая

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

Одним из радикальных защитных мероприятий при возникновении радиационных аварий является эвакуация жителей с загрязненных территорий. Ее целью является снижение возможного радиационного воздействия на население. При этом эвакуация сама по себе становится серьезным стрессогенным фактором, оказывающим негативное влияние на состояние здоровья человека и его психический статус. Цель данной работы – оценить состояние психического здоровья жителей села Муслюмово Челябинской области (территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате сбросов радиоактивных отходов в реку Теча), участвовавших в программе переселения в период 2006–2010 гг. Оценку состояния психического здоровья проводили дважды: первично в 2008–2010 гг. на фоне переселения, повторно в 2019–2020 гг., спустя 10 и более лет после переселения. В исследование включено 2 группы, их формировали методом случайного отбора. Основную группу составили 100 человек из числа участвующих в программе переселения. Группа сравнения включала 80 человек, проживающих на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, но не участвовавших в программе переселения. По основным социально-гигиеническим характеристикам группы однородны и сопоставимы. Использовали клинический, клинико-психологический методы, метод статистической обработки материалов. В результате работы установлено, что как при первичном, так и при повторном исследовании у жителей села Муслюмово Челябинской области, участвовавших в программе переселения, статистически значимо чаще ($p < 0,001$) наблюдали психические расстройства и расстройства поведения (невротические, связанные со стрессом и соматоформные расстройства (F 40)) в сравнении с контрольной группой. Также статистически значимо чаще по результатам опроса выявляли психогенное влияние переселения ($p \leq 0,001$) у пациентов основной группы. Полученные данные позволяют предположить долгосрочный эффект отселения на состояние психического здоровья вовлеченного населения. Понимание последствий проведенных защитных мероприятий (переселения) позволит уточнить критерии их применения, а также прогнозировать проявления психической дезадаптации у населения при потенциальном развитии радиационных аварий.

Ключевые слова: радиационное воздействие, защитные мероприятия, переселение, состояние психического здоровья, население радиоактивно загрязненных территорий.

Введение

Существенной проблемой в состоянии здоровья аварийно-облученных лиц в отдаленном периоде после радиационного воздействия являются психические расстройства. Как показывают многочисленные исследования, у пострадавших от бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС, пострадавших в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» развиваются астенические, тревожные и депрессивные расстройства, когнитивные нарушения, наблюдается рост суицидов и алкоголизма [1–6]. При этом до настоящего времени нет определенности в том, какие факторы играют ведущую роль в генезе этих нарушений. Одна группа исследователей указывает в качестве основного

радиационный фактор, другие исследователи считают, что отдаленные психические расстройства определяются перенесенным стрессовым воздействием, третьи утверждают, что совокупное действие радиационного, психогенного и сопутствующих нерадиационных факторов способствуют формированию психических расстройств в отдаленном периоде после аварийного облучения. Последние результаты исследований пострадавших в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» показали, что психические расстройства у населения были обусловлены не радиационным воздействием, а эвакуацией и изменившимся в связи с этим жизненным укладом переселенных лиц [7–9]. Аналогичные данные получены при изучении состояния психического здоровья эвакуантов

Буртовая Елена Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454141, г. Челябинск, ул. Воровского 68а, корпус 1; E-mail: burt@urcrm.ru

и переселенных лиц после аварии на Чернобыльской АЭС [10]. Тем самым исследователи указывают, что проведение защитных мероприятий становится существенной стрессовой нагрузкой, способствующей формированию психической патологии у лиц, подвергшихся аварийному радиационному воздействию. В связи с этим крайне актуально оценить роль нерадиационных факторов (прежде всего переселения) в генезе психических расстройств, развивающихся в отдаленном периоде у облученных лиц.

На Южном Урале история становления атомной промышленности сопровождалась крупными радиационными инцидентами (загрязнение реки Течи в результате сброса радиоактивных отходов (1949–1952 гг.), авария 1957 г. и инцидент 1967 г.). Часть населения Челябинской, Курганской и Свердловской областей подверглась повышенным уровням техногенного облучения, что определяло повышенный риск развития лейкозов, онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний у самих облученных и врожденных пороков и аномалий развития у их потомков [11].

Для минимизации отрицательных эффектов радиационного воздействия на здоровье населения был принят целый ряд защитных мероприятий. Наиболее радикальным мероприятием стала эвакуация населения из населенных пунктов верховья реки Течи и зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа. Проводимые защитные мероприятия осуществлялись на фоне отсутствия достоверной информации для населения о причинах происходящего, что способствовало росту психологической напряженности, страхов и в целом оказывало отрицательное влияние на состояние здоровья населения [10]. С начала 1950-х гг. было организовано медицинское наблюдение за лицами, подвергшимися радиационному воздействию, и их лечение. У части облученных лиц (940 человек) был диагностирован хронический лучевой синдром. Состояние психического здоровья в тот период углубленно не оценивали, имеющиеся данные достаточно скудны [11].

В период с 2006 по 2010 г. в Челябинской области было проведено отселение жителей населенного пункта (НП) Муслюмово, расположенного в бассейне реки Течи. Были отселены жители 741 домовладения (около 2400 человек). В период проведения данного мероприятия, а также после него сотрудниками лаборатории экологической патопсихологии Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России было проведено клинико-психологическое исследование, направленное на оценку состояния психического здоровья и социально-психологического статуса отселенных жителей. Целью этой работы было на примере переселения жителей НП Муслюмово оценить влияние данного защитного мероприятия на состояние психического здоровья вовлеченного в этот процесс населения. Некоторые результаты выполненной работы представлены в статье [12]. В дальнейшем нами было продолжено наблюдение за состоянием психического здоровья облученных лиц и их потомков, участвовавших в программе переселения НП Муслюмово.

Цель исследования – изучить состояние психического здоровья облученного населения в отдаленном периоде после отселения.

Материалы и методы

Исследование включено 100 жителей НП Муслюмово, подвергшихся радиационному воздействию, участвовавших в программе переселения в период с 2006 по 2010 г. (основная группа). Группу сравнения составили 80 человек из числа облученных лиц, проживающих на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, но не участвовавших в программе переселения. Группы были сформированы методом случайного отбора. Критериями исключения из выборки пациентов являлись хронические и острые психические расстройства психотического уровня, тяжелые соматические заболевания в стадии декомпенсации, онкологические заболевания, тяжелые черепно-мозговые травмы и острые нарушения мозгового кровообращения в анамнезе.

Дизайн исследования включал два этапа работы. Первый этап исследования проводили в 2008–2010 гг. на фоне мероприятий по переселению жителей НП Муслюмово. Повторно тех же лиц обследовали в 2019–2020 гг., спустя 10 и более лет после переселения. В исследовании использованы клинический, клинико-психологический методы, метод статистической обработки материалов. Клиническое обследование включало осмотр врача-психиатра с заполнением карты осмотра обследованного. Карта включала в себя социально-гигиенический и клинико-диагностический разделы. Диагностика психических расстройств осуществлялась в соответствии с Международной классификацией болезней 10-го пересмотра (МКБ-10) [13]. Статистическая обработка материалов проводилась с помощью пакета программ Statistica (Ver. 7.0). Значимость различий оценивалась с помощью U-критерия Манна – Уитни, критерия χ^2 Пирсона, точного критерия Фишера. Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

В обеих группах преобладали женщины (75,5% и 75% соответственно), имеющие среднее и среднее специальное образование (72,7% и 67,6%), состоящие в браке (80% и 72,5%), работающие (37,3% и 27,5%) и пенсионеры (41,8% и 51,2%). По основным социально-демографическим характеристикам сравниваемые группы однородны и сопоставимы.

Результаты исследования

По результатам исследования в 2008–2010 гг. среди лиц, участвующих в программе переселения, клинически выраженные психические расстройства выявлены у 85% обследованных лиц, 15% от числа обследованных психически здоровы (табл. 1).

В группе сравнения психическая патология при первичной оценке выявлена у 57,5%, психически здоровы 42,5% ($p_1 < 0,001$, где p_1 – отличия между основной и контрольной группами при первичном обследовании). У пациентов основной группы в 53% случаев были выявлены невротические, связанные со стрессом и соматоформные расстройства (F40 – F48): генерализованное тревожное расстройство (F 41.1) наблюдали в 18% случаев ($p_1 = 0,002$), неврастению (F 48.0) – также в 18% случаев. В структуре органических психических расстройств преобладало органическое эмоционально-лабильное расстройство (F 06.6) – 23% случаев.

В период обследования в 2019–2020 гг. в основной группе психические расстройства и расстройства поведения

Характеристика психической патологии исследуемых групп
Characteristics of the mental pathology of the studied groups]

Таблица 1

[Table 1

Диагноз (МКБ-10) [13] [Diagnosis (ICD-10)]	Первичная оценка [Initial assessment (2008–2010 гг.)]		Повторная оценка [Re-evaluation (2019–2020 гг.)]	
	Основная группа [Main group (n=100),%]	Группа сравнения [Comparison group (n=80),%]	Основная группа [Main group (n=100),%]	Группа сравнения [Comparison group (n=80),%]
Органическое эмоционально-лабильное расстройство [Organic emotionally labile disorder (F 06.6)]	23	21,3	34 $p_3=0,004$	25
Легкое когнитивное расстройство [Mild cognitive impairment (F 06.7)]	6	7,5	14 $p_3=0,01$	12,5
Алкогольная зависимость [Alcohol addiction (F 10.71)]	2	1,2	2	2,5
Шизофрения параноидная [Paranoid schizophrenia (F 20.0)]	1	0	1	0
Депрессивный эпизод [Depressive episode (F 32.0)]	0	1,2	8	3,8
Генерализованное тревожное расстройство [Generalized anxiety disorder (F 41.1)]	18 $p_1=0,002$	3,8	5 $p_3=0,003$	7,5
Пролонгированная депрессивная реакция [Prolonged depressive reaction (F 43.21)]	9	2,5	3	1,2
Соматоформное расстройство [Somatoform disorder (F 45.3)]	8	6,2	15 $p_2=0,02$	5
Неврастения [Neurasthenia (F 48.0)]	18	13,8	11	10
Психически здоров [Mentally healthy (F 00)]	15 $p_1<0,001$	42,5	7 $p_2<0,001$ $p_3=0,056$	32,5
Всего [Total]	100,0	100,0	100,0	100,0

p_1 – отличия между основной и контрольной группами при первичном обследовании;

p_2 – отличия между основной и контрольной группами при повторном обследовании;

p_3 – отличия между результатами обследования пациентов основной группы при первичной и повторной оценке

[Note:

p_1 – differences between the main and control groups during the initial examination;

p_2 – differences between the main and control groups during the reassessment;

p_3 – differences between the results of the examination of patients of the main group during the primary and reassessment].

наблюдали в 93% случаев, в группе сравнения – в 67,5% случаев ($p_2<0,001$, где p_2 – отличия между основной и контрольной группами при повторном обследовании). Таким образом, даже спустя длительный период времени после отселения психические расстройства встречались значительно чаще среди переселенных лиц. В структуре психической патологии в обеих группах преобладали органические психические расстройства (органическое эмоционально-лабильное расстройство (F 06.6) и легкое когнитивное расстройство (F 06.7)). При этом у пациентов основной группы разница при первичном и повторном обследовании по частоте встречаемости указанных расстройств была статистически значима ($p_3=0,004$ и $p_3=0,01$, где p_3 – отличия между результатами обследования пациентов основной группы при первичной и повторной оценке).

Достаточно часто наблюдали соматоформное расстройство (F 45.3) – в 15% случаев у пациентов основной группы против 5% в группе сравнения ($p_2=0,02$). Его особенностью были затяжное течение и полиморфность симптоматики. Неврастению выявляли в 11% и 10% случаев соответственно, без статистически значимой разницы между сравниваемыми группами.

У пациентов основной группы при первичной оценке (2008–2010 гг.) в клинической картине выявленных невротических расстройств наблюдали преобладание тревожной, тревожно-депрессивной и астено-субдепрессивной симптоматики. При повторном исследовании преобладали астенический и астено-депрессивный синдромы, синдром когнитивных нарушений.

В настоящем исследовании проводили оценку факторов, влияющих на состояние психического здоровья обследованных лиц (табл. 2).

При первичной оценке у пациентов основной группы выявлено статистически значимое преобладание психогенного фактора по сравнению с пациентами второй группы (83% обследованных лиц, $p_1 < 0,001$, где p_1 – отличия между основной и контрольной группами при первичном обследовании). Действительно в высказываниях наиболее часто встречались жалобы, связанные с беспокойством по поводу предстоящего отселения, опасение в отношении качества предоставляемого жилья, недовольство отсутствием надворных построек (баня, гараж, птичник и другие хозяйственные постройки), неразвитой социальной инфраструктурой на новом месте жительства. Существенным стрессовым фактором для обследуемых лиц являлся предстоящий переезд с постоянного места жительства, необходимость организации и проведения целого ряда мероприятий бытового характера, в том числе незапланированные финансовые вложения. С учетом того, что в большинстве случаев это были люди пенсионного возраста, указанные факторы оказывали дополнительное психогенное воздействие.

Частота встречаемости экзогенно-органических факторов (перенесенные ранее черепно-мозговые травмы, курение, злоупотребление алкоголем, перенесенные нейроинфекции) статистически значимо не отличались между сравниваемыми группами.

Обсуждение и заключение

Результаты проведенного исследования показывают, что, несмотря на то, что данное переселение жителей

НП Муслюмово не было экстренной эвакуацией в связи с чрезвычайной ситуацией, тем не менее, участвующие в переселении жители подверглись серьезному психогенному воздействию, которое отразилось на состоянии психического здоровья вовлеченных лиц повышенным уровнем невротических, связанных со стрессом и соматоформных расстройств (F 40).

Литературные данные также подтверждают влияние эвакуационных мероприятий на состояние здоровья населения, в том числе психического статуса. Так, в исследованиях, проведенных после аварии на АЭС «Фукусима-1», было показано, что психические расстройства у переселенных лиц наблюдались в диапазоне от 8,3% до 62,6% от числа обследованных, при этом у 52% наблюдали симптомы депрессии, у 10,5% – симптомы посттравматического стрессового расстройства. Авторы указывают, что долгосрочные изменения в среде обитания, вызванные эвакуацией и другими факторами, значительно повлияли на психическое здоровье жертв катастрофы после аварии на атомной электростанции [14].

При исследовании особенностей проявления психологического стресса у эвакуированных после аварии на АЭС «Фукусима-1» в период с 2011 по 2013 г. выявлены 4 варианта дистресса: тяжелый дистресс (5,7%), умеренный дистресс (27,4%), легкий дистресс (47,6%) и стойкий (19,3%) без восстановления [15]. Имела значение удаленность эвакуации жителей от прежнего места проживания. Так, у лиц, эвакуированных за пределы префектуры Фукусима, наблюдали более высокий психологический стресс по сравнению с теми, кто остался проживать внутри префектуры [15]. Дополнительно к фактору аварии и эвакуации добавлялось негативное влияние потери работы и потери привычных социальных связей.

Таблица 2

Характеристика экзогенных факторов

[Table 2]

Characteristics of exogenous factors]

Факторы [Factors]	Первичная оценка [Initial assessment (2008–2010 гг.)]		Повторная оценка [Re-evaluation (2019–2020 гг.)]	
	Основная группа [Main group (n=100),%]	Группа сравнения [Comparison group (n=80),%]	Основная группа [Main group (n=100),%]	Группа сравнения [Comparison group (n=80),%]
Психогенный [Psychogenic]	83 $p_1 < 0,001$ $p_3 = 0,001$	38,7	64 $p_2 < 0,001$	36,3
Перенесенные черепно-мозговые травмы [Traumatic brain injuries history]	14	13,7	19	16,3
Нейроинфекции [Neuroinfections]	3	3,7	4	3,7
Курение [Smoking]	20	26,3	12	15
Злоупотребление алкоголем [Alcohol abuse]	14	6,3	8	6,3

p_1 – отличия между основной и контрольной группами при первичном обследовании;

p_2 – отличия между группами при повторном обследовании;

p_3 – отличия между результатами обследования пациентов основной группы при первичной и повторной оценке

[Note:

p_1 – differences between the main and control groups during the initial examination;

p_2 – differences between the main and control groups during the reassessment;

p_3 – differences between the results of the examination of patients of the main group during the primary and reassessment]

При сравнительном исследовании заболеваемости психическими расстройствами у перемещенного и неперемещенного после цунами населения Андаманских и Никобарских островов было показано, что психиатрическая заболеваемость составила 5,2% среди перемещенного населения и 2,8% среди неперемещенного населения. Психическая патология включала паническое расстройство, тревожные расстройства и соматические жалобы. Депрессия и посттравматическое стрессовое расстройство были распределены одинаково в обеих группах [16]. В работе [10] убедительно показано, что через 6–10 лет после аварии на Чернобыльской АЭС эвакуанты (население, которое было эвакуировано в течение 2 недель после аварии на ЧАЭС, проживающие от нескольких месяцев до нескольких лет в промежуточных пунктах эвакуации) имели самые неблагоприятные показатели значимо высокой заболеваемости соматогенными невротическими расстройствами и депрессивными расстройствами с тенденцией к увеличению частоты алкогольной зависимости. Распространенность депрессивных расстройств возросла с 20% в 1992 г. до 35,3% в 1996 г. [10].

Полученные нами результаты соответствуют литературным данным. Наблюдаемые в период отселения расстройства характеризуются непсихотическим уровнем психической патологии, с преимущественно тревожной, тревожно-депрессивной, астено-депрессивной симптоматикой. Не было выявлено роста алкогольной зависимости у исследуемых пациентов, что в данном случае может быть обусловлено преобладанием женского населения в исследуемых группах. При повторном исследовании, спустя 10 и более лет, отмечали более высокие показатели психических расстройств у лиц, участвовавших в переселении. Полученные данные не могут полностью экстраполироваться на ситуацию эвакуации населения в случае радиационной аварии, но они позволяют приблизиться к пониманию механизмов возникновения психических расстройств у населения, в отношении которого применяются такие меры защитного характера. Дальнейший анализ полученных данных позволит сформировать группы риска среди населения по развитию состояний психической дезадаптации и разработать мероприятия, направленные на уменьшение психолого-психиатрических последствий применения защитных мероприятий (эвакуации) для населения в случае развития радиационных аварий.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена по материалам прикладной НИР «Оценка роли нерадиационных факторов в генезе психических расстройств у лиц, подвергшихся аварийному радиационному воздействию, в отдаленном периоде после облучения» (шифр: «Факторы»), выполняемой в рамках Государственного задания ФМБА России.

Литература

- Bromet E.J. Mental health consequences of the Chernobyl disaster // *Journal of Radiological Protection*. 2012. Vol. 32. P. 71-75. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/32/1/N71>.
- Bromet E.J., Havenaar J.M., Guey L.T. A 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident // *Journal of Clinical Oncology*. 2011. Vol. 23. P. 297-305. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2011.01.502>.
- Laidra K., Rahu K., Tekkel M. et al. Mental health and alcohol problems among Estonian cleanup workers 24 years after the Chernobyl accident // *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*. 2015. Vol. 50. P. 1753-1760. <https://doi.org/10.1007/s00127-015-1102-6>.
- Ando S., Kuwabara H., Araki T. et al. Mental health problems in a community after the Great East Japan Earthquake in 2011: A systematic review. // *Harvard Review of Psychiatry*. 2017. Vol. 25. №1. P. 15-28. <https://doi.org/10.1097/HRP.000000000000124>.
- Oe M., Fujii S., Maeda M. et al. Three year trend survey of psychological distress, posttraumatic stress, and problem drinking among residents in the evacuation zone after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident [The Fukushima Health Management Survey] // *Psychiatry and Clinical Neurosciences*. 2016. Vol. 70. №6. P. 245-252. <https://doi.org/10.1111/pcn.12387>.
- Loganovsky K., Marazziti D. Mental health and neuropsychiatric aftermath 35 years after the Chernobyl catastrophe: current state and future perspectives // *Clinical Neuropsychiatry*. 2021. Vol. 18. №2. P. 101-106. <https://doi.org/10.36131/cnfioritieditore20210204>.
- Yabe H., Suzuki Y., Mashiko H. et al. Psychological distress after the Great East Japan earthquake and Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: results of a mental health and lifestyle survey through the Fukushima health management survey in FY2011 and FY2012 // *Fukushima journal of medical science*. 2014. Vol. 60. №1. P. 57-67. <https://doi.org/10.5387/fms.2014-1>.
- Zhang W., Ohira T., Maeda M. et al. The association between self-reported sleep dissatisfaction after the Great East Japan Earthquake, and a deteriorated socioeconomic status in the evacuation area: the Fukushima Health Management Survey // *Sleep Medicine*. 2020. Vol. 68. P. 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2019.09.004>.
- Авария на АЭС «Фукусима-1»: радиологические последствия и уроки / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2021. 388 с.
- Бронский В.И. Социально-стрессовые расстройства и предпосылки реабилитации взрослого населения в отдаленном периоде Чернобыльской катастрофы: автореф. дисс. ... докт. мед. наук. СПб. 2005. 44 с.
- Аклеев А.В. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга; 2012. 464 с.
- Буртовая Е.Ю., Аклеев А.В., Шалагинов С.А. Психосоциальные аспекты переселения жителей села Муслимово Челябинской области вследствие чрезвычайных ситуаций на производственном объединении «Маяк» // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2011. № 2. С. 105-108.
- Международная классификация болезней 10-го пересмотра (МКБ-10). URL: <https://mkb-10.com/> (Дата обращения: 10.10.2023).
- Hori A., Murakami M., Tsubokura M. Against an insufficient intervention for patients with alcoholism or PTSD: An activity report on a psychiatric clinic after the 2011 complex disaster in Fukushima, Japan // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2023. Vol. 96. P. 103990. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103990>.
- Harigane M., Takebayashi Y., Murakami M. et al. Higher psychological distress experienced by evacuees relocating outside Fukushima after the nuclear accident: The Fukushima Health Management Survey // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. Vol. 52. P. 101962. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101962>.
- Math S.B., John J.P., Girimaji S.C. et al. Comparative study of psychiatric morbidity among the displaced and non-displaced populations in the Andaman and Nicobar Islands following the tsunami // *Prehospital and Disaster Medicine*. 2008. Vol. 23. №1. P. 29-34. <https://doi.org/10.1017/s1049023x00005513>.

Поступила: 10.10.2023 г.

Буртовая Елена Юрьевна – кандидат медицинских наук, заместитель директора по науке Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, Челябинск, ул. Воровского 68а, корпус 1; E-mail: burt@urcrm.ru
ORCID 0000-0002-1260-7745

Для цитирования: Буртовая Е.Ю. Психическое здоровье жителей радиоактивно загрязненных территорий Челябинской области в отдаленном периоде после отселения // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 18-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-18-24

Mental health of residents of radioactively contaminated territories of the Chelyabinsk region in the late period after the resettlement

Elena Yu. Burtovaia

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

In case of radiation accidents, one of the radical protective measures is the evacuation of residents from contaminated areas. Its purpose is to reduce the possible radiation effect to the population. At the same time, evacuation itself becomes a serious stressful factor that has a negative impact on a person's health and mental status. The objective of this work is to assess the state of mental health of residents of the Muslyumovo settlement in the Chelyabinsk region (the territory exposed to radioactive contamination as a result of radioactive waste releases into the Techa River) who participated in the resettlement program in the period from 2006 to 2010. Mental health was assessed twice: primarily in 2008-2010 against the background of resettlement, and again in 2019-2020, 10 or more years after the resettlement. The study includes 2 groups formed by random selection. The main group consisted of 100 persons from among the participants of the resettlement program. The comparison group included 80 persons living in the territories exposed to radioactive contamination, but not participating in the resettlement program. According to the main socio-hygienic characteristics, the groups are homogeneous and comparable. The following methods were used: clinical, clinical and psychological, and the method of statistical processing of materials. As a result, it was found that both in the primary and in the repeated study, residents of the Muslyumovo settlement, Chelyabinsk region, participating in the resettlement program, were statistically significantly more likely ($p < 0.001$) to have mental disorders and behavioral disorders (neurotic, stress-related and somatoform disorders (F 40)), compared with the control group. Also, according to the results of the survey, statistically significantly more often the psychogenic effect of resettlement ($p \leq 0.001$) was detected in patients of the main group. The data obtained suggest a long-term effect of resettlement on the mental health of the population involved. Understanding the consequences of the protective measures carried out (resettlement) will clarify the criteria for their application, as well as predict the manifestations of mental maladaptation in the population with the potential development of radiation accidents.

Key words: radiation exposure, protective measures, resettlement, mental health status, population of radioactively contaminated territories.

Information about the source of funding

The article is based on the materials of applied research "Assessment of the role of non-radiation factors in the genesis of mental disorders in persons exposed to emergency radiation exposure in the long-term period after exposure", (code: "Factors"), performed within the framework of the State assignment of the FMBA of Russia.

References

1. Bromet E.J. Mental health consequences of the Chernobyl disaster. *Journal of Radiological Protection*. 2012;32: 71-75. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/32/1/N71>.
2. Bromet E.J, Havenaar J.M, Guey L.T. A 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident. *Journal of Clinical Oncology*. 2011;23: 297-305. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2011.01.502>.

Elena Yu. Burtovaia

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky str., 68a, building 1, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: burt@urcrm.ru

3. Laidra K, Rahu K, Tekkel M, Aluoja A, Leinsalu M. Mental health and alcohol problems among Estonian cleanup workers 24 years after the Chernobyl accident. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*. 2015;50: 1753-1760. <https://doi.org/10.1007/s00127-015-1102-6>.
4. Ando S, Kuwabara H, Araki T, Kanehara A, Tanaka S, Morishima R, et al. Mental health problems in a community after the Great East Japan Earthquake in 2011: A systematic review. *Harvard Review of Psychiatry*. 2017;25(1): 15-28. <https://doi.org/10.1097/HRP.000000000000124>.
5. Oe M, Fujii S, Maeda M, Nagai M, Harigane M, Miura I, et al. Three year trend survey of psychological distress, posttraumatic stress, and problem drinking among residents in the evacuation zone after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident [The Fukushima Health Management Survey]. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*. 2016;70(6): 245-252. <https://doi.org/10.1111/pcn.12387>.
6. Loganovsky K, Marazziti D. Mental health and neuropsychiatric aftermath 35 years after the Chernobyl catastrophe: current state and future perspectives. *Clinical Neuropsychiatry*. 2021;18(2): 101-106. <https://doi.org/10.36131/cnforitieditore20210204>.
7. Yabe H, Suzuki Y, Mashiko H, Nakayama Y, Hisata M, Niwa S-I, et al. Psychological distress after the Great East Japan earthquake and Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: results of a mental health and lifestyle survey through the Fukushima health management survey in FY2011 and FY201.2 *Fukushima journal of medical science*. 2014;60(1): 57-67. <https://doi.org/10.5387/fms.2014-1>.
8. Zhang W, Ohira T, Maeda M, Nakano H, Iwasa H, Yasumura S, et al. The association between self-reported sleep dissatisfaction after the Great East Japan Earthquake, and a deteriorated socioeconomic status in the evacuation area: the Fukushima Health Management Survey. *Sleep Medicine*. 2020;68: 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2019.09.004>.
9. "Fukushima-1" NPP Accident: radiological consequences and lessons. Ed. by acad.of RAS G.G. Onishchenko and prof. A.Yu. Popova. St-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after prof. P.V. Ramzaev. 2021; 388 p. (In Russian).
10. Bronskij VI. Social anxiety disorders and prerequisites for rehabilitation of the adult population in the long-term period of the Chernobyl accident: abstract diss. ...doctor of medical Sciences. St. Petersburg. 2005; 44 p. (In Russian).
11. Akleyev AV. Chronic radiation syndrome in Techa riverside residents. Chelyabinsk: Kniga. 2012; 464 p. (In Russian).
12. Burtovaya EYu, Akleyev AV, Shalaginov SA. Psychosocial aspects of resettlement of the village of Muslyumovo Chelyabinsk region exposed to radiation as a result of emergencies at the PA "Mayak". *Mediko-biologicheskie i sotsialno-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychnykh situatsiyakh = Medicalbiological and socio-psychological problems of security in emergency situations*. 2011;2: 105-108. (In Russian).
13. International Classification of Diseases of the 10th revision (ICD-10) [Internet]. – Available from: <https://mkb-10.com/> [Accessed October 10, 2023] (In Russian).
14. Hori A, Murakami M, Tsubokura M. Against an insufficient intervention for patients with alcoholism or PTSD: An activity report on a psychiatric clinic after the 2011 complex disaster in Fukushima, Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2023;96: 103990. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103990>.
15. Harigane M, Takebayashi Y, Murakami M, Maeda M, Mizuki R, Oikawa Y, et al. Higher psychological distress experienced by evacuees relocating outside Fukushima after the nuclear accident: The Fukushima Health Management Survey. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021;52: 101962. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101962>.
16. Math SB, John JP, Girimaji SC, Benegal V, Sunny B, Krishnakanth K, et al. Comparative study of psychiatric morbidity among the displaced and non-displaced populations in the Andaman and Nicobar Islands following the tsunami. *Prehospital and Disaster Medicine*. 2008;23(1): 29-34. <https://doi.org/10.1017/s1049023x00005513>.

Received: October 10, 2023

For correspondence: Elena Yu. Burtovaia – candidate of medical sciences, Deputy Director for Science of the Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical-Biological Agency of Russia (Vorovsky str., 68a, building 1 Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: burt@urcrm.ru)
ORCID 0000-0002-1260-7745

For citation: Burtovaia E. Yu. Mental health of residents of radioactively contaminated territories of the Chelyabinsk region in the late period after the resettlement. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 18-24. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-18-24

Оценка применимости специальной модели поведения плутония в присутствии хелатов в случаях раневого поступления промышленных соединений плутония работникам ФГУП «ПО «Маяк»»

А.Б. Соколова, А.В. Ефимов, А.Б. Джунушалиев

Южно-Уральский институт биофизики Федерального Медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

В случаях поступления повышенных уровней плутония для ускорения выведения и снижения скорости отложения в органах основного депонирования используется хелат диэтиленetriаминпентауксусная кислота в форме соединения кальция Са-ДТПА (пентацин). Для интерпретации результатов измерений нуклида в экскретах при оценке доз внутреннего облучения от плутония используются биокинетические и дозиметрические модели, рекомендуемые МКРЗ; в случае поступления актинидов через поврежденные кожные покровы рекомендуется использовать модели НКРЗ США. Так как применение хелатов существенно меняет картину выведения плутония с мочой, для описания биокинетики плутония под воздействием хелатов разрабатываются специальные модели поведения комплекса Рн-ДТПА. Целью данной работы является оценка пригодности специальной модели поведения плутония в присутствии хелатов, разработанной автором К. Конзен, для описания биокинетики плутония в организме в случаях раневого поступления промышленных соединений плутония работникам производственного объединения «Маяк». В исследовании были использованы результаты измерения активности плутония в суточном количестве мочи для 3 случаев поступления актинидов через поврежденные кожные покровы и лечением Са-ДТПА: длительность применения препарата пентацин и сроки наблюдения за работниками зависели от уровней поступления. Для каждого случая был подобран наиболее вероятный тип поступившего соединения с помощью критерия Акаике. Затем, в те же дни, когда определялись фактические значения активности плутония в суточных количествах мочи, в соответствии с выбранной моделью были получены расчетные значения активности плутония. Для анализа соответствия расчетных данных фактически использовались статистические критерии Фостера – Стюарта, Бройша – Годффри, Манна – Уитни, Шапиро – Уилка, коэффициент детерминации. Получено, что для всех рассматриваемых случаев скорректированный коэффициент детерминации и критерий Фостера – Стюарта указывают на согласие фактических данных с расчетным. Выполненный статистический анализ согласия расчетных данных с фактическими результатами измерения активности плутония в моче показал, что предложенная К. Конзен специальная модель поведения плутония способна предсказывать активность плутония в моче как в период проведения мер по декорпорации радионуклидов, так и в период действия пентацина.

Ключевые слова: плутоний, декорпорация, хелат, аварийное поступление, актиниды, биокинетическая модель.

Введение

Для количественной оценки облучения, последовавшего в результате предполагаемого или действительного события, выходящего за рамки нормального, осуществляется специальный (аварийный) контроль персонала. Радиационными параметрами, характеризующими внутреннее облучение работника и измеряемыми при специальном дозиметрическом контроле внутреннего облучения при остром поступлении промышленных соединений плутония, являются в том числе

результаты измерений активности плутония в суточных количествах экскретов.

В случаях поступления повышенных уровней плутония может потребоваться медицинское вмешательство, включающее применение хелатных комплексов. В настоящее время в практике работы с плутонием используется диэтиленetriаминпентауксусная кислота (ДТПА) в форме соединения кальция Са-ДТПА (пентацин) [1]. Применение хелатов существенно меняет картину выведения плутония с мочой: в дни введения пентацина ско-

Соколова Александра Борисовна

Южно-Уральский институт биофизики

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

рост выведения плутония с мочой может увеличиваться на порядки величины [2, 3, 4].

Для интерпретации результатов измерений активности радионуклидов в экскретатах при оценке доз внутреннего облучения от плутония используются биокинетические и дозиметрические модели, рекомендуемые МКРЗ и НКРЗ США [5, 6, 7, 8]. Особенности метаболизма изотопов плутония в присутствии хелатов требуют нестандартных подходов при интерпретации полученных результатов измерения активности радионуклидов в экскретатах. Для описания биокинетики плутония под воздействием хелатов разрабатываются специальные модели поведения комплекса Pu-ДТПА [9-19]. Усилия, направленные на создание модели для комплекса Pu-ДТПА, обусловлены как необходимостью немедленного получения дозовых оценок в случаях аварийного облучения, так и необходимостью оптимизации самих методов применения хелатов [2].

Одной из первых моделей для описания поведения плутония в организме в присутствии хелатов была модель, предложенная R.M. Hall et al. в 1978 г. [9]. Это простейшая эмпирическая модель, но впоследствии параметры, предложенные R.M. Hall et al., использовались современными исследователями при разработке более сложных камерных моделей.

Модель, предложенная V.R. Bailey et al. в 2003 г., была разработана на основе системной модели, рекомендованной 67 Публикацией МКРЗ, по данным одного случая поступления смеси плутония и америция через микротравму кожи у профессионального работника [7, 11]. Основные параметры поведения ДТПА взяты из работ R.M. Hall et al. и T.R. La Vone [9, 10].

Следующая модель кинетики ДТПА и комплекса Pu-ДТПА на основе системной модели, рекомендованной 67 Публикацией МКРЗ, была разработана A.C. James et al. в 2007 г. [7, 12]. Действие хелатов было представлено посредством коэффициента, зависящего от вида хелата и камер перехода. Для разработки модели использовался случай ингаляционного поступления (донор USTUR с более чем 400 результатами измерений активности плутония в моче и более 90 результатами измерений активности плутония в кале) [12].

Следующим шагом в создании биокинетических моделей в присутствии хелатов была модель, разработанная в рамках European Coordinated Network on Radiation Dosimetry (CONRAD) [13, 14]. CONRAD-модель включает 3 компартментные «подсистемы» – «чистый» ДТПА, «чистый» Pu, комплекс Pu-ДТПА. Фиттирование модели выполнено на 2 случаях раневого поступления из базы данных IDEAS [13].

В 2009 г. в отделе радиационной безопасности и дозиметрии ЮУрИБФ были выполнены исследования по разработке модели на основе метода описания кинетики образования и обмена Pu-ДТПА системой нелинейных дифференциальных уравнений [15]. Поиск и оптимизация параметров модели проводились с использованием случая поступления плутония в организм работника ФГУП «ПО «Маяк»» через кожу в результате химического ожога.

В 2015 г. K. Konzen et al. была предложена модель для комплекса Pu-ДТПА, базирующаяся на CONRAD-модели [13, 14, 18]. В модели K. Konzen et al. была использована структурная схема CONRAD-модели, модифицированная

путем включения камер переходного состояния, которые соответствуют задержке комплекса Pu-ДТПА. В 2016 г. K. Konzen предложил новую модель для комплекса Pu-ДТПА на основе модифицированной системной модели Публикации 67 МКРЗ [19, 20].

На основе CONRAD-модели в 2019 г. Dumit et al. была предложена модификация модели поведения плутония в присутствии ДТПА, разработанная на основании результатов измерения активности плутония в моче и содержания плутония в печени и скелете, полученных по результатам измерений образцов органов, взятых при аутопсии, донора USTUR [16]. Основное отличие ее от CONRAD-модели состоит в том, что предполагается разное поведение комплексов Ca-ДТПА и Pu-ДТПА и добавлены новые камеры связывания плутония и ДТПА, в том числе камеры скелета.

В данном исследовании предпочтение было отдано модели K. Konzen et al. (2016), так как модель включает камеру связывания Pu и ДТПА в печени и использует модифицированную модель для описания кинетики плутония в системных органах. В пользу введения в модель камеры связывания Pu и ДТПА «Печень» свидетельствуют новые экспериментальные исследования на животных: в экспериментах на крысах было доказано наличие механизмов «внутриклеточного связывания», т.к. применение ДТПА до и после введения крысам плутония и америция значительно уменьшило содержание актинидов (плутония и америция) в печени и в скелете. Эти результаты авторы объясняют хелатообразованием во внутриклеточных структурах [21].

Механизмы «внутриклеточного» связывания играют большую роль при отложенном применении хелатов, когда доля циркулирующих в крови актинидов, доступная для хелата, незначительна вследствие короткого периода полувыведения ДТПА [21]. Хотя многие исследователи отмечают удаление актинидов из скелета, механизм этого процесса к настоящему времени все еще недостаточно изучен, что ставит под сомнение наличие камер связывания плутония и ДТПА в скелете, как это предложено в модели Dumit et al. [16, 17].

Цель исследования – оценить применимость специальной модели поведения плутония в присутствии хелатов, разработанной автором K. Konzen, для описания биокинетики плутония в организме для случаев раневого поступления промышленных соединений плутония работникам ФГУП «ПО «Маяк»».

Для этого был выполнен статистический анализ соответствия расчетных данных, полученных при использовании специальной модели поведения плутония в организме в присутствии хелатов, фактическим результатам измерения плутония в суточном количестве мочи.

Материалы и методы

Описание случаев

Случай 1. Работница ФГУП «ПО «Маяк» с поступлением актинидов через поврежденные кожные покровы с известной датой поступления.

Поступление было выявлено на предприятии через 2 сут после произошедшей нештатной ситуации. В тот же день работница была направлена на обследование в лабораторию №3 отдела радиационной безопасности и до-

симетрии ЮУриБФ в связи с загрязнением альфа-излучающими нуклидами кожи указательного пальца правой кисти. В месте загрязнения кожных покровов содержание актинидов составляло: ^{241}Am – 60 ± 6 Бк, ^{239}Pu – 670 ± 70 Бк. Хирургическое удаление загрязненных тканей позволило снизить уровни загрязнения практически на 90%.

Хелатотерапия

Первая инъекция пентамина была сделана на здравпункте ФГУП «ПО «Маяк»» после выявления загрязнения. Курс хелатотерапии для пострадавшей проводился в течение 16 дней, начиная с первого дня после выявления, в условиях стационара ЦПРП ФГБУЗ ЦМСЧ №71 ФМБА, ежедневно в дозировке 0,25 г.

Результаты измерения активности плутония в моче

Набор данных, привлеченных к исследованию, включает результаты измерения активности актинидов в 18 суточных количествах мочи, из них 11 получены в период применения пентамина. Суммарная активность плутония ($^{238}\text{Pu} + ^{239,240}\text{Pu}$) в суточном количестве мочи (СКМ) в период применения пентамина изменялась от 0,7 Бк в 1-й день до 0,05 Бк на 16-й день введения препарата. Последний результат измерений, включенный в исследование, был получен на уровне НПДИ метода через 501 день после инцидента, последующие результаты были ниже предела детектирования метода и в исследование не включены.

Случай 2 [22]. Работник с микротравмой пальца с последующим иссечением загрязненных тканей, с известной датой поступления.

Сразу после произошедшего инцидента работник был направлен на обследование в лабораторию №3. Содержание актинидов в месте микротравмы составило: ^{239}Pu – 750 ± 300 Бк, ^{241}Am – 190 ± 80 Бк. Было выполнено хирургическое иссечение загрязненных тканей кожи в области у второго пальца левой кисти, было удалено около 30% первоначально зарегистрированного содержания актинидов.

Хелатотерапия

Первый курс хелатотерапии для пострадавшего был выполнен в условиях стационара в течение 11 недель, начиная с 1-го дня после поступления: 1-й месяц ежедневно, затем через день – всего 59 инъекций с учетом введенной на здравпункте. Дозировка составляла 0,5 г, начиная с 42-х суток дозировка снижена до 0,25 г.

После проведения дозиметрического обследования на этапе заключительной оценки дозы для работника были проведены два дополнительных курса хелатотерапии – инъекции на 188-е, 189-е и 190-е сутки после поступления и с 630-х по 633-е сутки. Результаты измерения содержания актинидов в месте ранения, выполняемые в течение лечения и после выписки из стационара, свидетельствовали об отсутствии перехода актинидов из места ранения в кровь.

Результаты измерения активности плутония в моче

Для данного случая выполнено 64 измерения активности плутония в суточном количестве мочи, из них 26 результатов были получены в период выполнения основного курса хелатотерапии, 6 – в период выполнения дополнительных курсов. Суммарная активность изотопов плутония ($^{238}\text{Pu} + ^{239,240}\text{Pu}$) в СКМ в первый день основного курса применения пентамина составила 24,4 Бк. Во время проведения дополнительных курсов хелатотерапии активность в СКМ колебалась от 0,6 до 7,3 Бк. Последний результат, привлеченный к исследованию, был получен через 1780 дней после поступления, измеренная суммарная активность изотопов плутония в СКМ составляла 0,03 Бк.

Случай 3 [23]. Работник с выявленной в ходе планового индивидуального дозиметрического контроля микротравмой пальца правой руки.

Точная дата поступления неизвестна, со слов работника могло пройти около месяца с момента нештатной ситуации (принято, что поступление могло произойти в середине периода между травмированием и обнаружением микротравмы). Содержание ^{241}Am в месте микротравмы составляло 230 Бк, ^{239}Pu – 2500 Бк. В результате иссечения загрязненных тканей удалено более 99% загрязнения.

Хелатотерапия

Курс хелатотерапии включал ежедневные инъекции пентамина (с 15-х по 34-е сутки после обнаружения, всего 20 инъекций с дозировкой 0,25 г).

Результаты измерения активности плутония в моче

За весь период наблюдения работника после инцидента выполнено 29 измерений активности актинидов в СКМ, из них 12 получены в период применения пентамина, последнее измерение было выполнено через 2857 дней после предполагаемой даты поступления. В первые дни введения препарата суммарная активность плутония в СКМ колебалась на уровне 5–7 Бк, в завершающей стадии хелатотерапии активность составляла около 3 Бк. Через 1,5 года после поступления и вплоть до последнего измерения активность в СКМ не превышала 0,04 Бк.

Методы химической подготовки и методики измерения

Измерения активности изотопов плутония в пробах мочи были выполнены методом альфа-спектрометрии в соответствии с аттестованной методикой выполнения измерений¹.

Программные средства

Для проведения исследования был разработан программный код, реализующий биокинетическую модель поведения плутония в организме в присутствии ДТПА, представленную в работе K. Konzen et al. 2016 [18, 19].

¹ «Методика выполнения измерений изотопов плутония, америция, урана и тория в биосубстратах на спектрометре альфа-излучения системы EG&G ORTEC OCTETE PC. Свидетельство № 40090.5H304 от 18.05.2005 г., выдано ФГУП ВНИИФТРИ. Озерск, 2006. [Methodology for measurement of plutonium, americium, uranium and thorium isotopes in biosubstrates using EG&G ORTEC OCTETE PC alpha-radiation spectrometer. Certificate No.40090.5H304 of 18 May 2005, issued by FSUE VNIIFTRI (The Federal State Unitary Enterprise «Russian metrological institute of technical physics and radio engineering»). Ozersk, 2006 (In Russ.)]

Статистические критерии

Для анализа соответствия расчетных данных фактическим проверялись следующие предположения:

- распределение остатков подчиняется нормальному закону распределения с нулевым смещением;
- остатки подчиняются одному закону распределения;
- все остатки являются независимыми.

Для оценки согласия реального распределения данных с определенным видом теоретического распределения были использованы специальные критерии [24]:

- критерий Фостера – Стюарта использовался для проверки отсутствия тренда как в средних значениях остатков, так и в дисперсиях;

- критерий Шапиро – Уилка использовался для проверки нормальности распределения остатков;

- U-критерий Манна – Уитни был использован для проверки наличия смещений распределения остатков относительно нуля;

- критерий Бройша – Годфри использовался для проверки гипотезы о том, что остатки модели независимы;

- коэффициент детерминации позволяет оценивать соответствие регрессионной модели исходным данным. Скорректированный коэффициент детерминации является нижней границей для обычного коэффициента детерминации.

Для сравнения качества подгонки данных измерений к используемой модели использовался информационный критерий Акаике (AIC) [25].

Результаты и обсуждение

Исследование применимости модели для описания биокинетики плутония под воздействием хелатов было выполнено на 3 случаях раневого поступления промышленных соединений плутония работникам ФГУП «ПО «Маяк»» с разными уровнями поступления и режимами хелатотерапии.

Для каждого случая был подобран наиболее вероятный тип поступившего соединения с помощью критерия Акаике [25]. Для этого использовались все имеющиеся на настоящее время результаты измерений активности плутония в суточном количестве мочи. Исходя из проведенного анализа, для случая 1 наилучший сценарий предполагает поступление соединения плутония с умеренным удержанием в ране, для случая 2 и 3 – с сильным удержанием. На следующем этапе исследования рассчитывалась активность плутония в суточном количестве мочи по модели K. Konzen et al. 2016 (расчетное значение) в те же дни, когда она определялась фактически (фактические значения).

На рисунке показана динамика экскреции ^{239}Pu с мочой для наилучшего сценария поступления в каждом случае. По данным, представленным на рисунке, видно, что большой набор исходных результатов позволяет достаточно точно определить тип и количество поступившего соединения, следовательно, затем позволяет получить довольно точные расчетные оценки.

В таблице представлены значения критериев, использованных для проверки согласия фактических данных расчетным, во всех рассматриваемых критериях уровень значимости выбирался на уровне 5% [24].

Для всех случаев значение статистики Бройша – Годфри меньше нижнего критического значения статистики, т.е. гипотеза о независимости остатков отвер-

гается. Критерий Бройша – Годфри говорит о наличии автокорреляции, что может свидетельствовать о наличии зависимостей, которые не входят в модель регрессии, или о слишком близком положении данных друг к другу на шкале времени, что не свидетельствует о наличии согласия фактических данных расчетным. Для всех случаев сравнение значения критерия Фостера – Стюарта, полученное для средних остатков, с табличными значениями показало, что гипотеза об отсутствии тренда у средних остатков не отвергается. Следовательно, подтверждается согласие фактических данных расчетным. Кроме упомянутых критериев использовался скорректированный коэффициент детерминации. Так как для всех случаев его значение приближается к 1, скорректированный коэффициент детерминации указывает на согласие фактических данных расчетным.

Для каждого из рассматриваемых случаев скорректированный коэффициент детерминации и как минимум один статистический критерий указывают на соответствие фактического распределения измеренных данных расчетным значениям, полученным при помощи специальной модели K. Konzen. В проведенном исследовании пригодность специальной модели K. Konzen для описания биокинетики плутония в присутствии хелатов у работников ФГУП «ПО «Маяк» косвенно подтверждается согласием расчетной динамики выведения плутония с мочой и фактическими результатами измерения активности плутония в суточном количестве мочи на примере 3 случаев раневого поступления.

В многочисленных экспериментальных исследованиях установлено, что при комплексообразовании Са-ДТПА в биологических средах конкурирует с эндогенными лигандами, такими как трансферрин и органические соли (карбонаты, цитраты), связывание ДТПА и плутония происходит в крови, экстрацеллюлярных жидкостях и в печени [26, 27, 28, 29]. Несмотря на то, что в ряде экспериментальных исследований и наблюдений показана неэффективность удаления плутония и америция из костного объема [27, 29], некоторые исследователи отмечают удаление актинидов из скелета, не объясняя механизм процесса: происходит ли уменьшение активности в скелете за счет предотвращения его отложения в костной ткани или непосредственно за счет выведения актинидов из костного объема [12, 30]. Хотя изучением аспектов наиболее реалистичного представления физиологии человека и процесса комплексообразования продолжают заниматься различные исследовательские группы, к настоящему моменту все еще нет исчерпывающих ответов на вопросы, касающиеся механизмов хелатообразования (в том числе внутриклеточного связывания плутония с ДТПА), понимание которых необходимо для создания адекватной модели, описывающей биокинетику плутония в присутствии хелатов [2]. Решение проблем оценки дозы во время применения хелатных комплексов и оценки эффективности мер по декорпорации является актуальной задачей исследований и имеет большую практическую значимость: полученная информация может быть использована в качестве инструмента для оптимизации лечения.

Заключение

В настоящем исследовании была выполнена оценка применимости разработанной K. Konzen специальной мо-

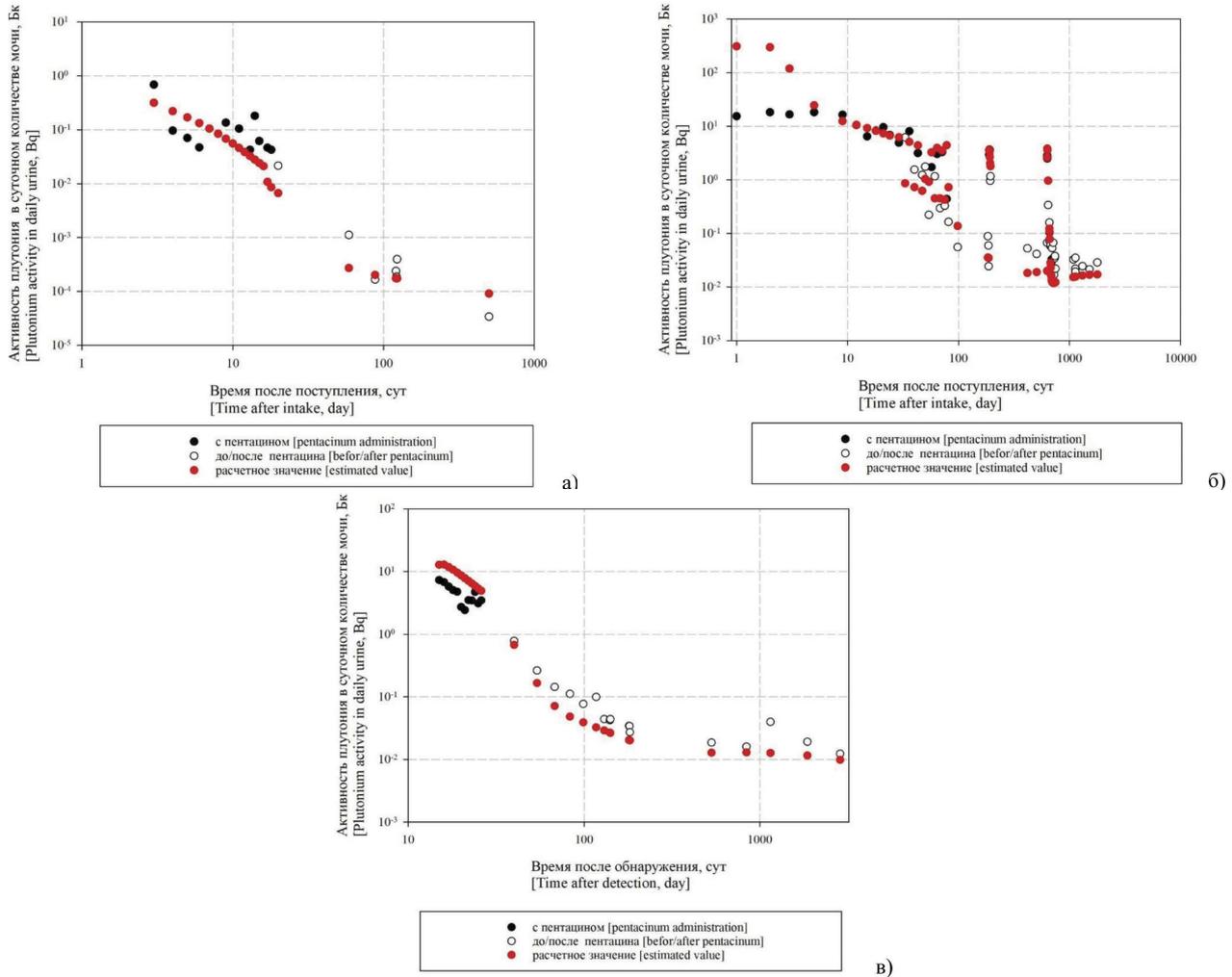


Рис. Динамика экскреции ²³⁹Pu с мочой: случай 1 (а), случай 2 (б), случай 3 (в)
 [Fig. Dynamics of ²³⁹Pu urinary excretion: case 1 (a), case 2 (б), case 3 (в)]

Значения статистических критериев согласия
Values of statistical goodness-of-fit tests]

Таблица
 [Table

Критерий [Test]	Случай [Case]		
	1	2	3
Критерий Шапиро – Уилка [Shapiro – Wilk test]	0,194*	0,001	0,048
Критерий Бройша – Годфри [Breusch – Godfrey test]	0,019	0,000	0,000
Критерий Манна – Уитни [Mann – Whitney test]	0,012	0,034	0,131**
Критерий Фостера – Стюарта [Foster – Stewart test] (mean)	-0,449#	0,443#	0,822#
Критерий Фостера – Стюарта [Foster – Stewart test] (deviation)	0,021#	-10,95	3,265
Скорректированный коэффициент детерминации [adjusted determination coefficient]	0,880##	0,827##	0,918##

* Критерий Шапиро – Уилка не отвергает нормальность распределения остатков, т.к. его значение выше критического значения критерия [Shapiro – Wilk test does not negate the normal distribution of residuals since its value is above the critical value of the test]

** U-критерий Манна – Уитни не отрицает предположение о несмещенности среднего остатков относительно 0, т.к. его значение выше критического значения критерия [Mann – Whitney U-test does not negate the assumption of the unbiased mean of the residuals relative to 0 since its value is above the critical value of the test]

Критерий Фостера – Стюарта не отвергает отсутствие тренда у средних остатков и/или отсутствие тренда в отклонениях остатков, т.к. его значение меньше табличного [Foster – Stewart test does not negate no trend for the means of residuals and/or no trend for the deviations of residuals since its value is below the table value]

Скорректированный коэффициент детерминации указывает на высокий уровень доли объясненной вариации [Adjusted determination coefficient indicates a higher proportion of explained variation].

дели описания поведения плутония в организме в присутствии ДТПА. В исследовании использовались результаты измерения активности плутония в моче у 3 работников ФГУП «ПО «Маяк»» с раневым поступлением промышленных соединений плутония. Выполненный статистический анализ согласия расчетных данных фактическим результатам измерения активности плутония в моче показал, что предложенная К. Konzen специальная модель поведения плутония способна предсказывать активность плутония в моче как в период проведения мер по декорпорации радионуклидов, так и в период последствия пентацина.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Соколова А.Б. осуществляла общее руководство выполнением работы, проанализировала данные, написала черновик рукописи и представила окончательный вариант в редакцию журнала.

Ефимов А.В. выполнил анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант статьи.

Джунушалиев А.Б. разработал программный код, выполнил статистический анализ.

Благодарности

Авторы благодарят рецензентов за тщательный анализ статьи.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 11.306.22.2 от 18.07.2022 г. по теме «Решение актуальных вопросов внутренней дозиметрии персонала и населения» (шифр «Радиометрия-22») в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года».

Литература

- ICRP. The metabolism of plutonium and related elements. ICRP Publication 48 // Annals of the ICRP. 1986. Vol. 16, No 2-3.
- Dumit S., Bertelli L., Klumpp J.A. et al. Chelation Modeling: The Use of Ad Hoc Models and Approaches to Overcome a Dose Assessment Challenge // Health Physics. 2020. Vol. 118, No.2. P.193–205.
- Соколова А.Б., Ефимов А.В., Сулова К.Г. Уточнение коэффициента ускорения выведения плутония с мочой под влиянием пентацина для интерпретации результатов контроля внутреннего облучения при хроническом ингаляционном поступлении промышленных соединений плутония // Вопросы радиационной безопасности. 2015. № 2 (78). С. 60-66.
- Sokolova A.B., Suslova K.G., Miller S.C. Urinary excretion of plutonium in Mayak workers during and after Ca-DTPA administration // Radiation Protection Dosimetry. 2021. Vol. 197 (2-4). P. 154-162.
- ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1 // Annals of the ICRP. 1979. Vol. 2, No 3/4.
- ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66 // Annals of the ICRP. 1994. Vol. 24, No 1–3.
- ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 66 // Annals of the ICRP. 1993. Vol. 23, No 3/4.
- NCRP Report No 156. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment. Bethesda (MD): National Council on Radiation Protection and Measurements; 2006.
- Hall R.M., Poda G.A., Fleming R.R., Smith J.A. A mathematical model for estimation of plutonium in the human body from urine date influenced by DTPA therapy // Health Physics. 1978. Vol. 34. P. 419-431.
- La Bone T.R. Evaluation of Intakes of Transuranics Influenced by Chelation Therapy // Internal Radiation Dosimetry. 1994. 667 p.
- Bailey B.R., Eckerman K.F., Townsend L.W. An analysis of a puncture wound case with medical intervention // Radiation Protection Dosimetry. 2003. Vol. 105. P. 509–512.
- James A.C., Sasser L.B., Stuit D.B. et al. USTUR whole body case 0269: demonstrating effectiveness of I.V. Ca-DTPA for Pu // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 449-455.
- Breustedt B., Blanchardon E., Berard P. et al. Biokinetic modeling of DTPA decorporation therapy: the CONRAD approach // Radiation Protection Dosimetry. 2009. Vol. 134. P. 38-48.
- Breustedt B., Blanchardon E., Berard P. et al. The CONRAD approach to biokinetic modeling of DTPA decorporation therapy // Health Physics. 2010. Vol. 99, No 4. P. 547-552.
- Разработка системы контроля поступления актинидов в организм персонала через поврежденные кожные покровы. Заключительный отчет по контракту №11.317.06.0. Шифр «Раны». Озерск, 2009.
- Dumit S., Avtandilashvili M., Strom D.J. et al. Improved Modeling of Plutonium-DTPA Decorporation // Radiation Research. 2019. Vol. 191. P. 201–210.
- Dumit S., Avtandilashvili M., McComish S.L. et al. Validation of a System of models for plutonium decorporation therapy // Radiation and Environmental Biophysics. 2019. Vol. 58. P. 227–235.
- Konzen K., Brey R. Development of the Plutonium-DTPA biokinetic model // Health Physics. 2015. Vol. 108, No 6. P. 565-573.
- Konzen K., Brey R., Miller S. Plutonium-DTPA model application with USTUR cases 0269 // Health Physics. 2016. Vol. 110, No 1. P. 59-65.
- Konzen K., Miller S., Brey R. Proposed modification to the plutonium systemic model // Health Physics. 2015. Vol. 109, No 1. P. 307-318.
- Gremy O., Laurent D., Coudert S. et al. Decorporation of Pu/Am Actinides by chelation therapy: new arguments in favor of an intracellular component of DTPA action // Radiation Research. 2016. Vol. 185. P. 568-579.
- Соколова А.Б., Ефимов А.В. Эффективность неотложной хелатотерапии для работников ПО «Маяк» в случае поступления актинидов через поврежденные покровы кожи // Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 3. С. 74-82.
- Соколова А.Б., Ефимов А.В. Декорпорация плутония: эффективность отложенной хелатотерапии в случаях острого поступления через поврежденные покровы кожи у работников ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 2. С. 70-80.
- Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с. ISBN 5-9221-0707-0.
- Motulsky H.J., Christopoulos A. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve fitting. San Diego CA: GraphPad Software Inc., 2003.

26. Bhattacharyya M.H., Guilmette R.A., Peterson D.P. et al. Estimation of skeletal plutonium levels based on DTPA-induced radionuclide excretion in feces: possible application to man // Health Physics. 1978. Vol. 34. P. 549-555.
27. Roedler H.D., Nobke D., Ohlenschlager L. et al. Incorporation of ^{241}Am : effectiveness of late DTPA chelation therapy // Radiation Protection Dosimetry. 1989. Vol. 26, No 1/4. P. 377-379.
28. Любчанский Э.Р., Кузьменко О.В., Осовец С.В., Соколова С.Н. Прогнозные оценки метаболизма и канцерогенного действия альфа-излучателей ($^{234,235}\text{U}$, ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am) в легких и скелете человека: обобщение экспериментальных данных, полученных на различных биологических моделях. Озерск, 2011. 304 с.
29. Guilmette R.A., Lindhorst P.S., Hanlon L.L. Interaction of Pu and Am with bone mineral in vitro // Radiation Protection Dosimetry. 1998. Vol. 79, No 1-4. P. 453-458.
30. Cohen N., Guilmette R.A., Wrenn M.E. Chelation of ^{241}Am from the liver and skeleton of adult baboon // Radiation Research. 1974. Vol. 58. P. 439-447.

Поступила: 24.07.2023 г.

Соколова Александра Борисовна – кандидат биологических наук, научный сотрудник Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: sokolova@subi.su

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6036-4178>

Ефимов Александр Владимирович – заведующий отделом радиационной безопасности и дозиметрии Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1110-6559>

Джунушалиев Артем Борисович – инженер-программист Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

Для цитирования: Соколова А.Б., Ефимов А.В., Джунушалиев А.Б. Оценка применимости специальной модели поведения плутония в присутствии хелатов в случаях раневого поступления промышленных соединений плутония работникам ФГУП «ПО «Маяк» // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 25-33. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-25-33

Assessing the applicability of a special model of plutonium behavior in presence of chelates in cases of wound intake of industrial compounds of plutonium in the FSUE Mayak PA workers

Alexandra B. Sokolova, Alexander V. Efimov, Artem B. Dzhunushaliev

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

In cases of intake of higher levels of plutonium, a chelate diethylenetriaminepentaacetic acid is used to enhance the elimination and reduce deposition rate in the organs of major deposit in the form of calcium compound Ca-DTPA (pentacium). To interpret the results of the nuclide measurements in excreta while estimating the doses of internal exposure to plutonium, the biokinetic and dosimetry models recommended by ICRP are applied; and in case of the actinide intake through damaged skin it is recommended to use the models of NCRP of the USA. Since the application of chelates significantly changes the picture of plutonium urinary excretion, special models of complex Pu-DTPA behavior are developed to describe the plutonium biokinetics in presence of chelates. The purpose of this work is to assess the suitability of a special model of plutonium behavior in presence of chelates elaborated by K. Konzen to describe the plutonium biokinetics in the body by the cases of wound intake of industrial plutonium compounds in the FSUE Mayak PA workers. This study used the measurements of plutonium activity in daily amount of urine for three cases with the actinide intake through damaged skin and Ca-DTPA treatment, the duration of pentacium application and observation periods for workers depending on the levels of intake. For each case, the most likely type of an entered compound was selected using Akaike information criterion, then the daily urinary activity of plutonium was calculated by the model (estimated value) on the same days when it was determined actually (actual values). The analysis of the compliance of calculated data with actual data was conducted using the statistic tests of Foster-Stewart,

Alexandra B. Sokolova

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: sokolova@subi.su

Breusch-Godfrey, Mann-Whitney, Shapiro-Wilk, and the determination coefficient. It was found that for all cases considered, the adjusted determination coefficient and Foster-Stewart test indicated the compliance of actual data with calculated ones. The statistical analysis of the compliance of calculated data with actual measurements of plutonium urinary activity showed that the special model of plutonium behavior proposed by K. Konzen was able to predict the urinary activity of plutonium during both the radionuclide decorporation measures and the period of pentacium aftereffect.

Key words: plutonium, decorporation, chelate, accidental intake, actinides, biokinetic model.

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

Sokolova A.B. provided overall management of the work, analyzed data, prepared the article draft and represented the final version of the manuscript for publication in the journal.

Efimov A.V. analyzed literature data, revised the intermediate version of the manuscript.

Dzhunushaliev A.B. designed the program code, performed the statistical analysis.

Acknowledgements

The authors are grateful to the reviewers for their thorough analysis of the article.

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 work was carried out within the framework of the State Contract No. 11.306.22.2 as of 18.07.2022 entitled "Solution of the topical issues of internal dosimetry of personnel and population" (code "Radiometry-22") within the implementation of federal target program "Nuclear safety and radiation protection for 2016-2020 and for the period till 2030".

References

- ICRP. The metabolism of plutonium and related elements. ICRP Publication 48. *Annals of the ICRP*. 1986;16(2-3).
- Dumit S, Bertelli L, Klumpp JA, Poudel D, Waters TL. Chelation Modeling: The Use of Ad Hoc Models and Approaches to Overcome a Dose Assessment Challenge. *Health Physics*. 2020;118(2): 193–205.
- Sokolova AB, Efimov AV, Suslova KG. Specification of the Pu urinary excretion enhancement factor due to pentacium to interpret results of internal exposure control in terms of chronic inhalation intake of industrial plutonium compounds. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2015;2(78): 60-66 (In Russian).
- Sokolova AB, Suslova KG, Miller SC. Urinary excretion of plutonium in Mayak workers during and after Ca-DTPA administration. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;197(2-4): 154-162.
- ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1. *Annals of the ICRP*. 1979;2(3/4).
- ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. *Annals of the ICRP*. 1994;24(1-3).
- ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. *Annals of the ICRP*. 1993;23(3/4).
- NCRP Report No 156. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda (MD); 2006.
- Hall RM, Poda GA, Fleming RR, Smith JA. A mathematical model for estimation of plutonium in the human body from urine date influenced by DTPA therapy. *Health Physics*. 1978;34: 419-431.
- La Bone T.R. Evaluation of Intakes of Transuranics Influences by Chelation Therapy. *Internal Radiation Dosimetry*. 1994: 667.
- Bailey BR, Eckerman KF, Townsend LW. An analysis of a puncture wound case with medical intervention. *Radiation Protection Dosimetry*. 2003;105: 509–512.
- James AC, Sasser LB, Stuit DB, Glover SE, Carbaugh EH. USTUR whole body case 0269: demonstrating effectiveness of I.V. Ca-DTPA for Pu. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127: 449-455.
- Breustedt B, Blanchardon E, Berard P, Fritsch P, Giussani A, Lopez MA, et al. Biokinetic modeling of DTPA decorporation therapy: the CONRAD approach. *Radiation Protection Dosimetry*. 2009;134: 38-48.
- Breustedt B, Blanchardon E, Berard P, Fritsch P, Giussani A, Lopez MA, et al. The CONRAD approach to biokinetic modeling of DTPA decorporation therapy. *Health Physics*. 2010;99 (4): 547-552.
- Developing the monitoring system of actinide intake in the personnel through damaged skin. Final report under the contract No.11.317.06.0. Code «Wounds». Ozersk; 2009. (In Russian).
- Dumit S, Avtandilashvili M, Strom DJ, McComish SL, Tabatadze G, Tolmachev SY. Improved Modeling of Plutonium-DTPA Decorporation. *Radiation Research*. 2019;191: 201–210.
- Dumit S, Avtandilashvili M, McComish SL, Strom DJ, Tabatadze G, Tolmachev SY. Validation of a System of models for plutonium decorporation therapy. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2019;58: 227–235.
- Konzen K, Brey R. Development of the Plutonium-DTPA biokinetic model. *Health Physics*. 2015;108(6): 565-573.
- Konzen K, Brey R, Miller S. Plutonium-DTPA model application with USTUR cases 0269. *Health Physics*. 2016;110(1): 59-65.
- Konzen K, Miller S, Brey R. Proposed modification to the plutonium systemic model. *Health Physics*. 2015;109(1): 307-318.
- Grémy O, Laurent D, Coudert S, Griffiths NM, Miccoli L. Decorporation of Pu/Am actinides by chelation therapy: new arguments in favor of an intracellular component of DTPA action. *Radiation Research*. 2016;185: 568-579.
- Sokolova AB, Efimov AV. Effectiveness of chelation therapy for the Mayak PA personnel in case of actinide intake via damaged skin. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2019;3: 74-82 (In Russian).
- Sokolova AB, Efimov AV. Plutonium decorporation: effectiveness of delayed chelation at acute actinide intake via injured skin in the Mayak PA workers. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2021;2: 70-80 (In Russian).
- Kobzar AI. Applied mathematical statistics. For engineers and researchers. Moscow: FIZMATLIT; 2006. 816 p. ISBN 5-9221-0707-0 (In Russian).
- Motulsky HJ, Christopoulos A. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide

- to curve fitting. San Diego CA: GraphPad Software Inc.; 2003.
26. Bhattacharyya MH, Guilmette RA, Peterson DP, Chao FC, Lindeinbaum A. Estimation of skeletal plutonium levels based on DTPA-induced radionuclide excretion in feces: possible application to man. *Health Physics*. 1978;34: 549-555.
 27. Roedler HD, Nobke D, Ohlenschlager L, Shieferdecker H, Doerfel H, Renz K. Incorporation of ²⁴¹Am: effectiveness of late DTPA chelation therapy. *Radiation Protection Dosimetry*. 1989;26(1/4): 377-379.
 28. Lyubchansky ER, Kuzmenko OV, Osovets SV, Sokolova SN. Predictive estimates for the metabolism and carcinogenic effects of alpha-emitters (^{234,235}U, ²³⁷Np, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am) in human lungs and skeleton: summary of the experimental data obtained by various biological models. Ozersk; 2011: 304 p. (In Russian).
 29. Guilmette RA, Lindhorst P S and Hanlon LL. Interaction of Pu and Am with bone mineral in vitro. *Radiation Protection Dosimetry*. 1998; 79 (1–4): 453–458.
 30. Cohen N, Guilmette RA, Wrenn ME. Chelation of ²⁴¹Am from the liver and skeleton of adult baboon. *Radiation Research*. 1974;58: 439-447.

Received: July 24, 2023

For correspondence: Alexandra B. Sokolova – PhD, Researcher, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: sokolova@subi.su)

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6036-4178>

Alexander V. Efimov – Head of Department of Radiation Safety and Dosimetry, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1110-6559>

Artem B. Dzhunushaliev – Programmer engineer, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

For citation: Sokolova A.B., Efimov A.V., Dzhunushaliev A.B Assessing the applicability of a special model of plutonium behavior in presence of chelates in cases of wound intake of industrial compounds of plutonium in the FSUE Mayak PA workers. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 25-33. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-25-33

Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 3: Принципы планирования радонометрических обследований

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

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

Комплексное радиационное обследование населенных пунктов 6 районов восточной части Оренбургской области в части облучения природными источниками ионизирующего излучения, выполненное в 2019 г., выявило многочисленные факты превышения гигиенических нормативов содержания радона в воздухе жилых и общественных зданий. Было установлено, что основной причиной высоких уровней облучения населения является поступление радона из грунта под зданиями. В условиях ограниченных ресурсов в 2020 г. специалистам научно-исследовательского института радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева, Управления Роспотребнадзора по Оренбургской области и «Центра гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» необходимо было выработать новые подходы для продолжения исследований, обеспечивающие наибольшую полноту измерительной информации, необходимой для обеспечения радиационной безопасности населения области, при минимальных вложениях и трудозатратах. В качестве исследуемого фактора было выбрано содержание радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, а в качестве наиболее подходящего метода исследований – интегральный метод определения объемной активности радона с использованием трековых детекторов, обеспечивающий как масштабируемость исследования, так и простоту измерения. Поскольку ингаляционное облучение радоном и его дочерними продуктами распада является второй по значимости причиной возникновения рака легкого, выбор районов области для первоочередного радонометрического обследования производился на основе данных об онкозаболеваемости органов дыхания в районах Оренбургской области за период 2009–2018 гг. Проведенное в 2020–2023 гг. обследование в запланированных 6 районах и 1 городском округе выявило превышения гигиенических нормативов содержания радона в воздухе помещений в 5 из них. До 2025 г. планируется провести радонометрическое обследование еще 3 районов Оренбургской области с повышенными показателями онкозаболеваемости органов дыхания.

Ключевые слова: природные источники ионизирующего излучения, радон в воздухе помещений, объемная активность, интегральный метод, трековый радиометр, онкозаболеваемость органов дыхания, злокачественные новообразования, Оренбургская область.

Введение

Выполненное в 2019 г. специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, Управления Роспотребнадзора по Оренбургской области и Центра гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области комплексное радиационное обследование 34 населенных пунктов Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского,

Светлинского районов и Ясненского городского округа (ГО), расположенных в восточной части Оренбургской области [1], выявило многочисленные факты превышений гигиенических нормативов, установленных санитарными правилами и нормами¹ из-за высоких уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Следует отметить, что речь идет об эксплуатиру-

¹ 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 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009 г., регистрационный № 14534) (далее – НРБ-99/2009). [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 г. No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534) (hereinafter – NRB-99/2009). (In Russ.)]

Кормановская Татьяна Анатольевна

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru

емых зданиях жилого и общественного назначения, расположенных, как правило, в сельских населенных пунктах, построенных преимущественно во второй половине XX в.; информации о показателях радиационной безопасности таких зданий до проведения обследования 2019 г. практически не было.

Полученные результаты привели специалистов в области радиационной безопасности населения к однозначному выводу о необходимости расширения географии исследований уровней содержания радона в эксплуатируемых жилых и общественных зданиях на территории Оренбургской области. Однако, несмотря на высокую оценку уже проделанной работы, финансирование дальнейших программ по снижению уровней природного облучения населения в региональном бюджете Оренбургской области предусмотрено не было.

Вопреки сложившейся ситуации, специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и органов Роспотребнадзора Оренбургской области не смогли позволить себе остановить обследование, первый этап которого выявил факты значительных превышений гигиенических нормативов в зданиях жилого и общественного назначения [1], а также группы населения, получающие не только высокие по классификации ОСПОРБ 99/2010² и СанПиН 2.6.1.2800-10³ дозы природного облучения (свыше 10 мЗв/год), но и дозы, превышающие установленный в НРБ-99/2009 предел доз профессионального облучения персонала группы А при работе с техногенными источниками излучения (20 мЗв/год) [2].

Ограниченность ресурсов и удаленность Санкт-Петербурга и Оренбургской области друг от друга продиктовали необходимость поиска новых форм взаимодействия специалистов научно-методического, практического и управленческого звеньев Роспотребнадзора: в 2020 г. для продолжения исследований факторов природного облучения на территории Оренбургской области ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, Управлением Роспотребнадзора по Оренбургской области и Центром гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области была инициирована на безвозмездной основе научно-исследовательская работа (НИР), различные этапы выполнения которой продолжают и в настоящее время.

Для достижения основной цели работы – радиационно-гигиенической оценки уровней облучения населения Оренбургской области за счет природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) – в условиях новых реалий изначально необходимо было решить следующие задачи:

- выбрать исследуемые факторы;
- выбрать методы исследования факторов;
- выбрать месторасположение объектов для первоочередного обследования.

Обоснование выбора факторов для исследования

Основой для планирования исследований в рамках инициативной НИР послужили результаты комплексного радиационного обследования 2019 г. в 34 населенных пунктах 6 районов восточной части Оренбургской области. Выполненные оценки доз облучения жителей за счет ПИИИ показали, что [2]:

– дозы внешнего терригенного облучения населения за счет содержания ПРН в объектах окружающей среды и строительных материалах зданий находятся в диапазоне 0,88–1,04 мЗв/год;

– дозы внутреннего облучения за счет перорального поступления в организм природных радионуклидов (ПРН) с питьевой водой подземных источников водоснабжения составляют 0,023–0,223 мЗв/год;

– дозы внутреннего облучения за счет ингаляции радона, торона и их короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) лежат в диапазоне 2,64–24,26 мЗв/год.

Именно ингаляционное облучение жителей радонном и его ДПР при нахождении в жилых и общественных зданиях является причиной повышенных и высоких доз природного облучения населения восточной части Оренбуржья (из 34 обследованных населенных пунктов в 7 средние по населенному пункту дозы являются высокими, в 18 – повышенными и только в 9 – приемлемыми), при этом основным путем поступления радона в помещения является эксхалация с поверхности грунта под зданиями. Для отдельных населенных пунктов вклад радоновой составляющей в суммарную дозу облучения населения за счет всех ПИИИ превысил 94% [2].

На основании вышесказанного понятно, что при планировании распространенных по территории области исследований был выбран наиболее весомый дозообразу-

² Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 г. № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010 г., регистрационный № 18115), с изменениями, внесенными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 г. № 43 (зарегистрировано Минюстом России 05.11.2013 г., регистрационный № 30309) (далее – ОСПОРБ 99/2010). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18155), as amended by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 16.09.2013 No. 43 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No. 30309) (hereinafter – OSPORB 99/2010). (In Russ.)]

³ Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 г. № 171 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 27.01.2011 г., регистрационный № 19587) (далее – СанПиН 2.6.1.2800-10). [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 27.01.2011, registration No. 19587) (hereinafter – SanPiN 2.6.1.2800-10). (In Russ.)]

ющий фактор, приводящий к повышенному природному облучению населения, – содержание радона в воздухе помещений зданий жилого и общественного назначения.

Обоснование выбора методов исследования

Определение уровней содержания радона в воздухе проводится экспрессным (мгновенным), квазиинтегральным, интегральным и непрерывным (с помощью радон-мониторов) методами [3].

Использование экспрессного метода измерения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в рамках выполнения инициативной НИР не представлялось возможным, поскольку каждое измерение ЭРОА изотопов радона проводится при непосредственном участии сотрудника испытательной лаборатории, что, кроме необходимости финансирования командировочных работ, влечет за собой большие затраты рабочего времени значительного числа специалистов. Квазиинтегральный метод определения объемной активности (ОА) радона, хоть и позволяет проводить одновременно большое число измерений, также является трудозатратным из-за короткого периода (1–6 суток) экспонирования адсорбционных камер. Применение радон-мониторов для исследований значительного числа объектов также невозможно вследствие дороговизны и малочисленности этих средств измерений.

Таким образом, единственной возможностью выполнить запланированное радонометрическое обследование жилых и общественных зданий на территории Оренбургской области стало применение интегрального метода определения ОА радона. Нельзя не упомянуть, что начало НИР в 2020 г. совпало со сложной эпидемиологической ситуацией в стране, обусловленной пандемией новой коронавирусной инфекции, поэтому интегральный метод измерений ОА радона в тот момент (и далее, вплоть до снятия антиковидных ограничений) являлся единственно возможным способом исследований, включающим контакт местных жителей, учеников и воспитанников детских учреждений со специалистами, выполняющими радонометрическое обследование.

При обследовании жилых домов интегральный метод измерения ОА радона является наиболее достоверным (так как охватывает длительный промежуток времени), в помещениях же общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей его применение может завышать данные об уровнях облучения населения, поскольку пассивные пробоотборные камеры с трековыми детекторами (интегральные трековые радиометры радона – ИТРП) фиксируют α -частицы при распаде радона и в ночное время, когда в общественных зданиях, как правило, отсутствуют посетители [4]. В то же время консерватив-

ность оценок, полученных при применении интегрального метода измерений ОА радона в общественных зданиях, позволяет с уверенностью утверждать, что если при использовании данного метода определения ОА радона в помещениях не выявлено превышений гигиенического норматива, то другие методы измерений однозначно не выявят значений, не соответствующих требованиям санитарных правил. Однако в случае, если интегральные измерения ОА радона в отдельных общественных зданиях выявили значения, превышающие гигиенический норматив, для принятия административных решений необходимо провести дополнительные исследования по оценке уровней содержания радона в воздухе помещений с применением экспрессного метода определения ЭРОА изотопов радона в часы работы организации при штатном режиме работы систем вентиляции здания или проветривания. Этот подход реализован в новых методических рекомендациях МР 2.6.1.0333-23 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности»⁴, где предлагается использовать интегральный метод определения ОА радона (с помощью ИТРП) в общественных зданиях с некруглосуточным пребыванием людей при выполнении скрининговых обследований большого числа объектов с последующим детальным обследованием тех конкретных объектов, где были выявлены превышения гигиенических нормативов.

В рамках выполнения НИР в каждый обследуемый район Оренбургской области из Санкт-Петербурга почтовой связью направлялись партии ИТРП по 100–150 штук. Организацию расстановки и сбора ИТРП в жилых домах и общественных зданиях населенных пунктов обеспечивали территориальные отделы ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области»; далее собранные партии ИТРП возвращались в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, где проводились их обработка и анализ с использованием Комплекта аппаратуры для измерения средней объемной активности радона в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М по аттестованной методике⁵. Одновременно с расстановкой ИТРП заполнялись анкеты, в которые заносились основные характеристики зданий (год постройки, материал стен, наличие подвалов, тип окон, наличие и тип систем отопления, водоснабжения и вентиляции), а также дата установки и сбора ИТРП.

Обоснование выбора местоположения объектов обследования

Решение первых двух задач работы (выбор исследуемого фактора и метода его исследования), можно так выразиться, «лежало на поверхности», чего нельзя сказать

⁴ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности: Методические рекомендации МР 2.6.1.0333-23. Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 01.12.2023 г. [Radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Guidelines MR 2.6.1.0333-23. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 01.12.2023. (In Russ.)]

⁵ Объемная активность ²²²Rn радона в воздухе. Методика выполнения измерений интегральными трековыми радиометрами радона. Санкт-Петербург, 1994. [Radon-222 concentration in air. Integrated measurement method using passive solid-state nuclear track detectors. St. Petersburg, 1994. (In Russ.)]

о третьей задаче, поставленной перед исполнителями НИР: какие именно районы Оренбургской области требуют первоочередного радонометрического обследования.

По данным официального портала Правительства Оренбургской области⁶, в состав субъекта Российской Федерации входят 487 муниципальных образований: 13 городских округов, 29 муниципальных районов, которые включают 445 сельских поселений. Обследование уровней содержания радона в воздухе жилых и общественных зданий 5 районов области (Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского) и 1 ГО (Ясненского) было выполнено в 2019 г. Исполнителям НИР предстояло сделать выбор между оставшимися 24 районами и 12 ГО; определить и обосновать очередность выполнения исследований, поскольку одновременный охват большого числа территорий области в рамках выполнения НИР на безвозмездной основе без отрыва сотрудников от основных профессиональных обязанностей был невозможен.

Как правило, планирование радоновых обследований в населенных пунктах проходит на основе либо уже имеющихся единичных (или более многочисленных) данных об уровнях природного облучения жителей за счет содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых или новых (сдающихся в эксплуатацию) зданий.

Однако, к сожалению, в данном случае использовать для планирования указанные данные не представлялось возможным: информации о показателях радиационной безопасности эксплуатируемых с середины – конца XX в. зданий жилого и общественного назначения в сельских населенных пунктах области оказалось катастрофически мало, а новое строительство в них тоже, как правило, не велось.

Вторым «классическим» подходом к выбору территорий в практике проведения радонометрических обследований является подход, основанный на данных о геологических характеристиках местности. Известны факты о повышенной радоноопасности территорий, где развита добыча золота (к таким относится, например, г. Алдан в Республике Саха (Якутия), основанный в 1923 г. как поселок золотодобытчиков [5, 6]), однако основные золотодобывающие территории Оренбургской области – Кваркенский район и Ясненский ГО [7] – находятся на востоке области (рис. 1) и уже были обследованы в рамках выполнения Государственного контракта в 2019 г.

Исходя из того, что, по мнению международных организаций [9, 10], радон является второй по значимости после табакокурения причиной возникновения злокачественных новообразований (ЗНО) органов дыхания, сотрудниками ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в качестве

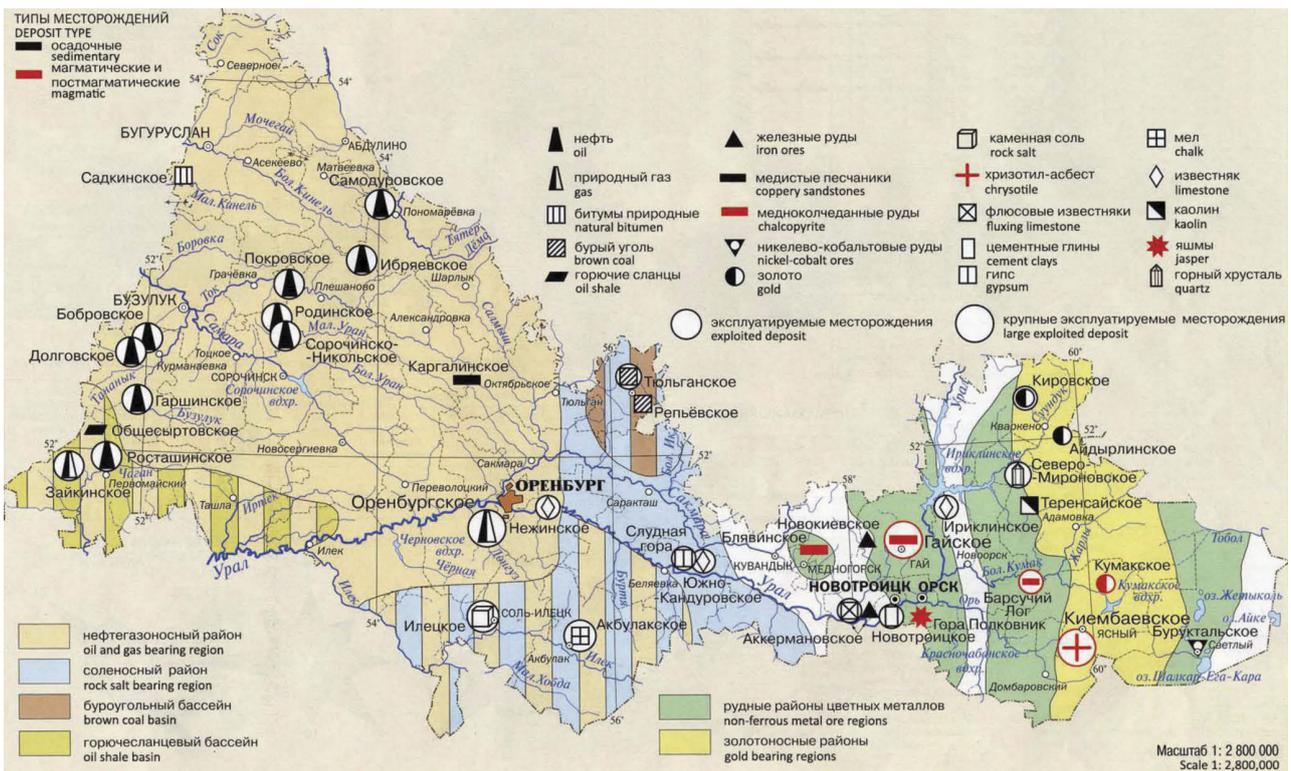


Рис. 1. Карта добычи полезных ископаемых на территории Оренбургской области [8]
[Fig. 1. Map of mining in the Orenburg region (adapted from [8])]

⁶ Официальный портал Правительства Оренбургской области – Административно-территориальное деление. URL: <https://orenburg-gov.ru/activity/544/> (Дата обращения: 24.01.2024 г.) [Official portal of the Orenburg region Government – Administrative and territorial division. Available from: <https://orenburg-gov.ru/activity/544/> (Accessed 24 Jan 2024) (In Russ.)]

критерия для планирования радиометрических обследований на территории Оренбургской области решено было использовать данные онкозаболеваемости органов дыхания в разных районах региона. Источником информации послужила Форма федерального статистического наблюдения № 7 «Сведения о злокачественных новообразованиях»⁷ Оренбургской области. Анализ данных формы за 2009–2018 гг. позволил выделить районы с высокими показателями ЗНО органов дыхания населения для первоочередного проведения обследования эксплуатируемых жилых и общественных зданий на содержание радона в воздухе помещений. Необходимо отметить, что специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева впервые в своей практике применили такой принцип планирования радиометрических обследований; результаты нового подхода трудно было спрогнозировать, поскольку форма № 7 содержит данные о ЗНО органов дыхания, обусловленных всеми причинами возникновения заболеваний, главной из которых является табакокурение.

Форма территории Оренбургской области на карте (см. рис. 1) позволяет условно разделить регион на 3 части: западную, центральную и восточную. При планировании радиометрического обследования специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева сочли целесообразным и желательным, чтобы в список районов для первоочередного обследования попали районы, расположенные в разных частях области.

Проведенный анализ стандартизованных показателей заболеваемости ЗНО органов дыхания (трахеи, бронхов, легкого – ТБЛ) населения Оренбургской области за 10-летний период (2009–2018 гг.) показал превышение областного показателя (44,5 случаев на 100 тыс. населения) над аналогичным среднероссийским (40,2 случаев на 100 тыс. населения). В ряде районов области показатели ЗНО ТБЛ значительно превышали как среднероссийские, так и средние по региону значения (табл.).

На рисунке 2 представлены районы с максимальными по области показателями заболеваемости ЗНО ТБЛ

Таблица

Средние стандартизованные показатели заболеваемости ЗНО ТБЛ в районах Оренбургской области (случаев на 100 тыс. населения) в 2009–2018 гг.

[Table

Average standardized trachea, bronchi, and lung cancer morbidity rates in the districts of the Orenburg region (cases per 100 thousand population) for 2009–2018]

Восточные районы [Eastern districts]	Случаев на 100 тыс. нас. [Cases per 100 000 pop.]	Центральные районы [Central districts]	Случаев на 100 тыс. нас. [Cases per 100 000 pop.]	Западные районы [Western districts]	Случаев на 100 тыс. нас. [Cases per 100 000 pop.]
Адамовский [Adamovsky]	43,1	г. Оренбург [Orenburg]	39,7	Абдулинский [Abdulinsky]	50,7
Домбаровский [Dombarovsky]	40,0	Акбулакский [Akbulaksky]	41,7	Асекеевский [Asekeyevsky]	51,7
Кваркенский [Kvarkensky]	59,2	Александровский [Alexandrovsky]	50,0	Бугурусланский [Buguruslansky]	59,9
Новоорский [Novoorsky]	45,9	Беляевский [Belyayevsky]	57,3	Бузулукский [Buzuluksky]	59,6
Светлинский [Svetlinsky]	37,1	Илекский [Ileksky]	46,4	Грачевский [Grachyovsky]	44,0
Ясненский [Yasnensky]	30,7	Новосергиевский [Novosergiyevsky]	41,4	Красногвардейский [Krasnogvardeysky]	35,2
г. Медногорск [Mednogorsk]	51,2	Октябрьский [Oktyabrsky]	56,5	Курманаевский [Kurmanayevsky]	57,5
г. Новотроицк [Novotroitsk]	46,2	Оренбургский [Orenburgsky]	45,2	Матвеевский [Matveyevsky]	65,5
г. Орск [Orsk]	41,4	Переволоцкий [Perevolotsky]	51,3	Первомайский [Pervomaysky]	42,1
Гайский [Gaysky]	39,2	Сакмарский [Sakmarsky]	45,2	Пономаревский [Ponomaryovsky]	41,2
Кувандыкский [Kuvandyksky]	60,3	Саракташский [Saraktashsky]	50,5	Северный [Severny]	42,9
		Соль-Илецкий [Sol-Iletsy]	43,7	Сорочинский [Sorochinsky]	42,7
		Тюльганский [Tyulgansky]	52,7	Ташлинский [Tashlinsky]	39,5
		Шарлыкский [Sharlyksky]	52,6	Тоцкий [Totsky]	45,8

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

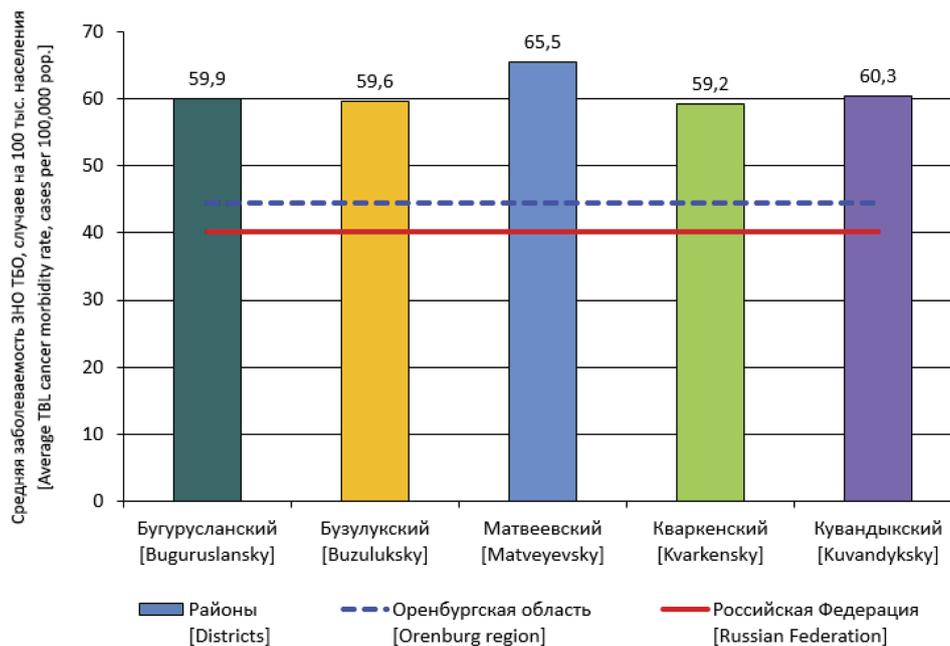


Рис. 2. Районы Оренбургской области с наибольшими средними за 2009–2018 гг. показателями заболеваемости ЗНО ТБЛ
[Fig. 2. Districts of the Orenburg region with the highest average trachea, bronchi, and lung (TBL) cancer morbidity rates for 2009–2018]

в сравнении со среднерегionalным и среднероссийским показателями.

Из 5 районов Оренбургской области (2 района находятся в восточной части региона, 3 – в западной) с наибольшими по области показателями заболеваемости ЗНО ТБЛ в одном – Кваркенском – радиометрическое обследование проводилось в 2019 г. (именно в нем были выявлены наибольшие уровни содержания радона в воздухе помещений); таким образом, «рейтинг» для первоочередного обследования, запланированного на 2020–2022 гг., возглавили Бугурусланский, Бузулукский, Матвеевский и Кувандыкский районы; дополнительно было решено добавить к этому списку ГО Медногорск, поскольку территориально он находится в границах Кувандыкского района и показатель заболеваемости ЗНО ТБЛ в нем также превышает среднеобластной и среднероссийский уровни.

При планировании работ на 2023–2025 гг. было решено распространить географию исследований и на центральные районы Оренбургской области, поскольку имеющиеся данные об уровнях содержания радона в зданиях жилого и общественного назначения центрального Оренбуржья в большинстве своем характеризуют ситуацию в крупных городах области (а не в сельской местности), и, как правило, они относятся к зданиям новой постройки, а не эксплуатируемым с прошлого века. Принцип выбора районов также основывался на анализе показателей заболеваемости ЗНО ТБЛ; в итоге в 2023 г. было выполнено радиометрическое обследование жилых и общественных зданий Беляевского и Саракташского районов, на 2024–2025 гг. запланировано обследование Октябрьского, Тюльганского и Шарлыкского районов.

На рисунке 3 на карте Оренбургской области [11] отмечены районы, в которых уже выполнялись обследования на содержание радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в 2019 г. (выделены голубым пря-

моугольником), а также районы, в которых обследование запланировано на основе анализа данных заболеваемости ЗНО ТБЛ и проводится с 2020 по 2025 г. (отмечены стрелками).

Результаты и обсуждение

В рамках выполнения специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, Управления Роспотребнадзора по Оренбургской области и Центра гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области инициативной НИР «Радиационно-гигиеническая оценка уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в районах Оренбургской области с повышенными показателями заболеваемости ЗНО органов дыхания» в период 2020–2023 гг. обследование на содержание радона в воздухе помещений с использованием интегрального метода (846 измерений) было выполнено в 85 зданиях общественного назначения и в 90 жилых домах 63 населенных пунктов 6 районов и 1 ГО Оренбургской области; превышения гигиенического норматива содержания радона в воздухе помещений были выявлены в 5 из 7 обследованных административно-территориальных образованиях региона.

Подробные отчеты о результатах выполнения НИР будут опубликованы в следующих частях настоящей статьи, однако, забегая вперед, можно отметить, что наибольшая доля измерений с превышениями гигиенического норматива (20,7% от общего числа измерений), как и наибольшая доля зданий жилого и общественного назначения, где были выявлены повышенные уровни содержания радона (50,0% от общего числа зданий) (диапазон значений ЭРОА радона в жилых домах составил от 40 до 415 Бк/м³, в общественных зданиях – от 35 до 745 Бк/м³ при значении гигиенического норматива 200 Бк/м³), характерны для Матвеевского района Оренбургской области – терри-

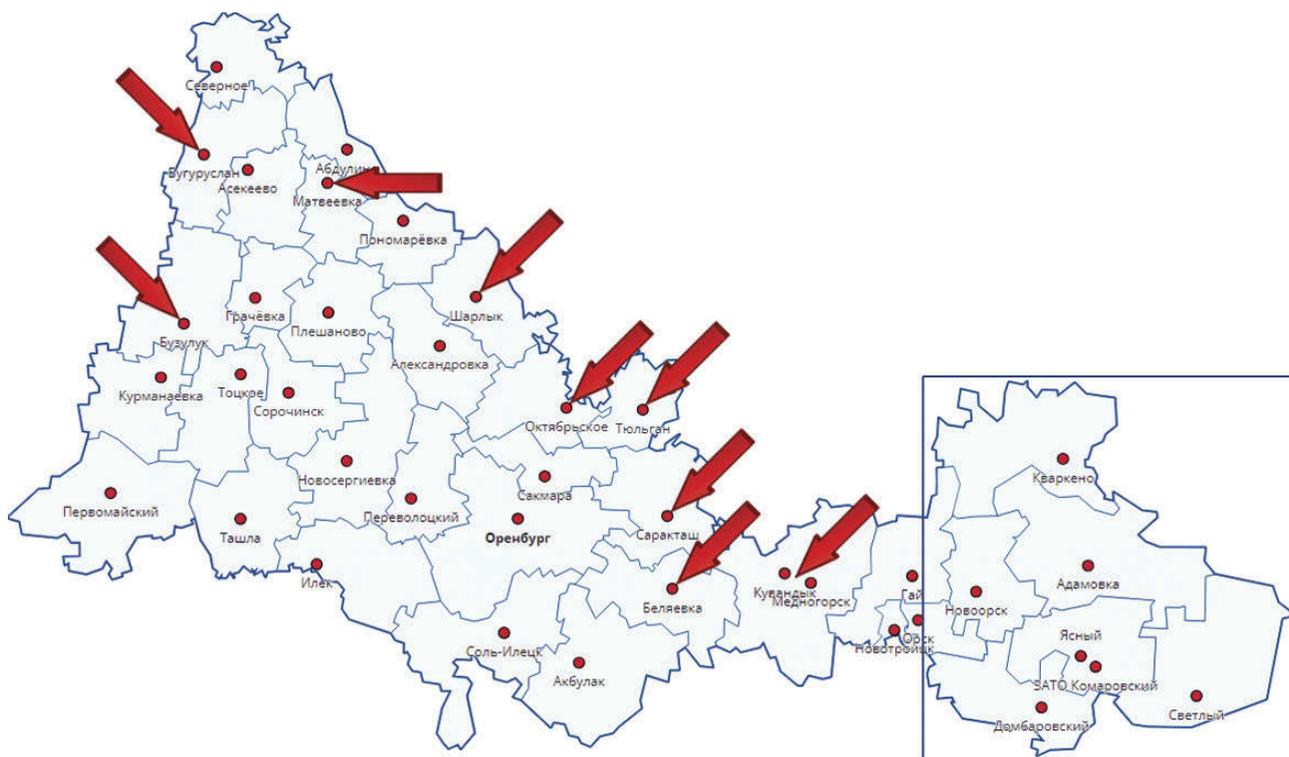


Рис. 3. Районы Оренбургской области, обследованные в 2019 г. (выделены прямоугольником) и запланированные для обследования на 2020–2025 гг. (отмечены стрелками)

[Fig. 3. Districts of the Orenburg region surveyed in 2019 (in rectangle) and planned for the survey in 2020–2025 (marked with arrows)]

тории с максимальными по региону показателями заболеваемости ЗНО органов дыхания. Этот факт, конечно, не говорит о том, что единственной причиной повышенных показателей онкозаболеваемости органов дыхания жителей района является радон в воздухе помещений жилых и общественных зданий, однако полученные данные дают основание утверждать, что определенная доля случаев заболеваемости ЗНО легких может быть радон-индуцированной.

Примененные принципы планирования обследования жилых и общественных зданий Оренбургской области на содержание радона в воздухе помещений интегральным методом измерений ОА радона, в том числе использование для определения очередности выполнения обследований данных об онкозаболеваемости органов дыхания в районах области (впервые в практике ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева), доказали свою эффективность выявлением в большинстве обследованных районов помещений эксплуатируемых зданий жилого и общественного назначения с превышениями гигиенического норматива содержания радона. Полученные результаты стали основой для планирования Управлением Роспотребнадзора по Оренбургской области практических мероприятий, направленных на обеспечение радиационной безопасности населения при облучении ПИИИ.

Заключение

Инициативная НИР «Радиационно-гигиеническая оценка уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в районах Оренбургской области с повышенными показателями за-

болеваемости ЗНО органов дыхания», выполняемая совместно ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, Управлением Роспотребнадзора по Оренбургской области и Центром гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области, является примером того, как, несмотря на неблагоприятные условия (отсутствие средств, дополнительных человеческих ресурсов, сложная эпидемиологическая ситуация в стране), специалисты Роспотребнадзора нашли пути для решения задач, направленных на изучение уровней природного облучения населения и последующую разработку защитных мероприятий.

Результаты работы, доложенные на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы радиационной гигиены» (Санкт-Петербург, 10–11 октября 2023 г.), вызвали большой отклик среди специалистов Роспотребнадзора других регионов России; по примеру Оренбуржья в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева с предложением о выполнении совместной инициативной НИР обратились специалисты Управления Роспотребнадзора по Ивановской области.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

Кононенко Д.В. провел статистическую обработку данных по онкозаболеваемости, подготовил рисунки

и таблицу, английский перевод и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. подготовил описание методов исследования, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Работа не имела источников финансирования.

Литература

1. Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е. и др. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования населенных пунктов восточных районов Оренбургской области // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 6–18. DOI 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18.
2. Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е. и др. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 2: Дозы облучения населения восточных районов Оренбургской области // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 7–18. DOI 10.21514/1998-426X-2023-16-2-7-18.
3. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон. От фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
4. Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В. и др. Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых зданий с некруглосуточным пребыванием людей // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 29–40. DOI 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.
5. Исторический багаж. «Золотой» Алдан – центр добычи золота в Якутии. URL: <https://xn--80aabjhkiabkj9b0amel2g.xn--p1ai/post/zolotoy-aldan-%E2%80%94centr-dobychi-zolota-v-yakutii-1601> (Дата обращения: 24.01.2024).
6. Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40, № 4. С. 354–369.
7. Геологический музей Оренбургского государственного университета. Путеводитель по музею и его экспонатам: учебное пособие / Г.В. Тараборин; Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2014. 200 с.
8. Атлас Оренбургской области / под науч. ред. чл.-корр. РАН А.А. Чибилёва. М.: Просвещение, «ДИ ЭМ БИ», 2003. 32 с.
9. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999. 516 p.
10. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press, 2009. 110 p.
11. Навигаторы, карты мира, карты России. Карта Оренбургской области с районами. URL: <https://ynavigator.ru/karta-orenburgskoj-oblasti.html> (Дата обращения: 24.01.2024).

Поступила: 24.01.2024 г.

Кормановская Татьяна Анатольевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru

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

ORCID: 0000-0002-1392-1226

Сапрыкин Кирилл Александрович – старший научный сотрудник, заведующий лабораторией дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 3: Принципы планирования радонометрических обследований // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 34-43. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-34-43

Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 3: Approaches to radon survey planning

Tatyana A. Kormanovskaya, Dmitry V. Kononenko, Kirill A. Saprykin

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

A comprehensive radiation survey of settlements in six districts of the eastern part of the Orenburg region in terms of exposure to natural sources of ionizing radiation, carried out in 2019, revealed numerous exceedances of the hygienic norm (action level) for indoor radon concentration in residential and public buildings. It was found that among other studied factors, exhalation of radon from the ground under the buildings is the main source of high levels of public exposure. Due to the lack of funding for the continuation of the survey in 2020, specialists of St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Directorate of Rospotrebnadzor in the Orenburg region and the Center of Hygiene and Epidemiology in the Orenburg region needed to develop new approaches to survey planning. These new approaches should provide maximum amount of measurement information necessary to ensure radiation safety of the region's population, with minimal financial investments and labor costs. Indoor radon concentration in residential and public buildings was undoubtedly chosen as the studied factor, and the integrated measurement method using SSNTDs was chosen as the most suitable method for the objectives of the survey due to its scalability and ease of detectors deployment. Since exposure to radon and its progeny is the second leading cause of lung cancer after smoking, the selection of priority districts of the region for the radon survey was based on average standardized trachea, bronchi, and lung cancer morbidity rates in the districts of the Orenburg region for 2009–2018. The survey conducted in 2020–2023 revealed exceedances of the hygienic norm (action level) for indoor radon concentration in five of seven surveyed districts. By 2025 it is planned to conduct radon surveys in three more districts of the Orenburg region with increased respiratory systems cancer morbidity rates.

Key words: natural sources of radiation, indoor radon, radon concentration, integrated measurement method, SSNTD, malignant neoplasms, lung cancer, Orenburg region.

Personal contribution of the authors

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

Kononenko D.V. conducted statistical analysis of cancer morbidity data, prepared figures and table, made the translation and edited the interim version of the manuscript.

Saprykin K.A. prepared the description of measurement methods and edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interest

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

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Vyaltsina NE, Gaevoy SV, Bondar LV, Kononenko DV, et al. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 1: Results of the comprehensive survey of settlements in the eastern districts of the Orenburg region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023; 16(1): 6–18. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18>.
2. Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Vyaltsina NE, Gaevoy SV, Kononenko DV, Saprykin KA, et al. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 2: Doses to the population of the eastern districts of the Orenburg region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023; 16(2): 7–18. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-2-7-18>.
3. Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon. From fundamental research to regulatory practice. Moscow: Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical-Biological Agency; 2016. 432 p. (In Russian).
4. Vasilyev AS, Romanovich IK, Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Saprykin KA, Balabina TA. Substantiation of methodical approaches to the control of indoor radon concentration in existing public buildings with non-round-the-clock stay of people. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021; 14(3): 29–40. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40>.
5. Historical baggage. “Golden” Aldan, the center of gold mining in Yakutia. Available from: <https://xn--80aabjhkiab-kj9b0amel2g.xn--p1ai/post/zolotoy-aldan-%E2%80%94-centr-dobychi-zolota-v-yakutii-1601> [Accessed 24 Jan 2024]. (In Russian).

Tatyana A. Kormanovskaya

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

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

6. Boytsov VE, Pilipenko GN. Gold and uranium in Mesozoic hydrothermal deposits of Central Aldan. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits*. 1998;40(4): 354–369. (In Russian).
7. Geological Museum of the Orenburg State University. Guide to the museum and its exhibits: study guide / ed. Taraborin GV. Orenburg: Orenburg State University; 2014. 200 с.
8. Atlas of the Orenburg region. Moscow: Prosveshchenie, "DI EM BI"; 2003. 32 p. (In Russian).
9. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington, D.C.: National Academy Press; 1999. 516 p.
10. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press; 2009. 110 p.
11. Navigators, world maps, maps of Russia. Map of the Orenburg region with districts. Available from: <https://ynavigator.ru/karta-orenburgskoj-oblasti.html> [Accessed 24 Jan 2024]. (In Russian).

Received: January 24, 2024

For correspondence: Tatyana A. Kormanovskaya – Ph.D. in Biological Sciences, Leading researcher, Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: f4dos@mail.ru)

Dmitry V. Kononenko – Researcher, Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-1392-1226

Kirill A. Saprykin – Senior researcher, Head of the Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V., Saprykin K.A. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 3: Approaches to radon survey planning. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 34-43. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-34-43

Гармонизация количественной оценки между ПЭТ/КТ-аппаратами разных поколений: Biograph mCT и Biograph Vision

А.В. Петрякова^{1,2}, Л.А. Чипига^{1,3,4}, Г.И. Андреев⁵, Е.А. Громова⁵, Г.В. Катаева^{3,5}, К.В. Ковалев⁵, С.С. Онищенко⁶, Е.В. Безумова⁷

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

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

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

⁵ Медицинский институт Березина Сергея, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Московский научно-исследовательский онкологический институт имени П.А. Герцена – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

⁷ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Блохина, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

Использование современных позитронных эмиссионных томографов, в частности, с цифровыми детекторами, позволяет получать изображение с лучшим качеством, повышает выявляемость патологических очагов малых размеров, а также позволяет снизить время сканирования и вводимую пациенту активность, что приводит к снижению дозы облучения пациента. Однако значения количественных параметров изображения смещаются вверх, что может приводить к значимым различиям с количественной оценкой, полученной на аппарате предыдущего поколения. Для сопоставления количественных оценок, полученных на аппаратах разных поколений, требуется проведение процедур, направленных на достижение сопоставимости (гармонизацию) количественных параметров изображения, совместно с регулярным контролем качества выполнения исследования. Цель настоящей работы – сравнение разных методик гармонизации количественных параметров изображений на примере гармонизации 2 аппаратов: Biograph mCT 128 и Biograph Vision 600. На аппаратах было проведено сканирование фантома NEMA IEC Body, заполненного раствором ¹⁸F, в режиме списка в 2 положениях кровати с перекрытием в области сфер в течение 5 мин на 1 положение кровати. При анализе изображений для каждой сферы фантома определяли коэффициент восстановления, который использовали для гармонизации. Гармонизация Vision и mCT была проведена двумя методами: подбор гармонизированных параметров реконструкции и использование технологии EQ.PET. Считали, что допустимый интервал расхождений, полученных коэффициентов восстановления на аппарате Vision с аппаратом mCT: $\pm 10\%$. Значения коэффициентов восстановления, полученные для реконструкции 4 итерации и 5 подмножеств, ToF+PSF, Гаусс 7 мм, матрица 220×220 полностью укладываются в 20% интервал. Полученные значения коэффициентов восстановления с применением EQ = 6 мм (оптимальное значение) укладываются в 20% интервал, за исключением очагов диаметром 10 и 13 мм. Оба рассматриваемых метода гармонизации позволяют приблизить значения количественной оценки, однако применение технологии EQ.PET ограничено для очагов малых размеров. При этом метод гармонизации, подразумевающий подбор гармонизированных параметров реконструкции, является наиболее широко применяемым, а технология EQ.PET позволяет гармонизировать количественную оценку без использования нескольких протоколов реконструкции и потерь в визуализирующей способности.

Ключевые слова: позитронная эмиссионная томография, Biograph mCT 128, Biograph Vision 600, гармонизация количественной оценки, параметры реконструкции, EQ.PET, фантом NEMA IEC Body.

Петрякова Анастасия Валерьевна

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

Введение

Метод позитронной эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ), признан одним из наиболее широко используемых методов диагностики онкологических заболеваний, в том числе при стадировании и оценке терапевтического эффекта [1,2]. Исследование ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ является одним из наиболее распространенных для диагностирования онкологических заболеваний [3], что обусловлено высокой степенью выявляемости злокачественных новообразований за счет повышенного в них метаболизма глюкозы. Метод ПЭТ/КТ дает возможность интерпретации диагностических результатов не только качественно, но и количественно путем оценки накопленной активности радиофармацевтического лекарственного препарата в организме пациента.

В то же время существуют объективные ограничения, которые зависят от чувствительности детекторов и пространственного разрешения аппаратов и определяют качество изображения и точность количественной оценки [4]. За последнее десятилетие в клиническую практику ПЭТ были широко внедрены технологии времяпролетной функции (ToF) и функции рассеяния точки (PSF), что значительно улучшило качество изображения [5]. В настоящее время традиционные аналоговые фотоэлектронные умножители (PMT) заменяют на полупроводниковые детектирующие устройства на основе кремния – кремниевые фотоэлектронные умножители (SiPM), которые улучшают временное разрешение, чувствительность и пространственное разрешение системы [6–8]. Применение новых технологий позволяет оптимизировать протоколы проведения исследований и сканирования за счет снижения времени сканирования и вводимой пациенту активности, что приводит к снижению дозы облучения пациента [9]. Однако развитие аппаратного парка и программного обеспечения может приводить к клинически значимым различиям количественной оценки между различными аппаратами [10]. При использовании количественной оценки в многоцентровых исследованиях или в медицинских организациях, оснащенных несколькими аппаратами разных поколений, необходимо свести к минимуму различия количественной оценки, то есть привести к сопоставимости (гармонизировать) количественные параметры ПЭТ-изображения. Это может быть достигнуто путем гармонизации параметров протоколов сбора данных (сканирования), реконструкции и проведения исследований (подготовки пациентов) [11, 12], а также проведения регулярных процедур контроля качества выполнения диагностического исследования¹.

Использование гармонизированных параметров протоколов сканирования и реконструкции зачастую не позволяет использовать все возможности визуализации современных аппаратов. Согласно рекомендациям Европейской ассоциации ядерной медицины (EANM) [12], целесообразно использовать несколько реконструк-

ций с различными параметрами: для гармонизированной количественной оценки и для оптимальной визуальной (качественной) оценки. При этом EANM разработала программу аккредитации с целью обеспечения сопоставимой количественной оценки путем гармонизации параметров сканирования и реконструкции изображения [13].

В качестве альтернативного метода гармонизации количественной оценки без потерь визуализирующей способности, возникающих при изменении методов реконструкции изображения, была разработана технология EQ.PET (Siemens), основанная на использовании сглаживающих алгоритмов, применяемых к реконструированному изображению [14]. Технология EQ.PET представляет собой применение фильтра Гаусса с изменяемым значением полной ширины на половине максимума (значение EQ фильтра). Значения EQ фильтра определяются с использованием специализированного фантома. Применение данной технологии позволяет свести к минимуму различия количественной оценки без изменения стандартных параметров реконструкции или дополнительной реконструкции и дополнительно оценивать гармонизированные (с EQ фильтром) значения количественных параметров изображения.

Цель исследования – сравнение разных методов гармонизации количественных параметров ПЭТ-изображения на примере гармонизации 2 ПЭТ/КТ-аппаратов: Biograph mCT 128 и Biograph Vision 600.

Материалы и методы

ПЭТ/КТ-аппараты

ПЭТ-изображения были получены при сканировании фантома NEMA IEC Body на 2 ПЭТ/КТ-аппаратах: Biograph mCT 128 (mCT) и Biograph Vision 600 (Vision) (Siemens Healthineers, Germany). Технические характеристики аппаратов представлены в таблице 1.

Ежедневная калибровка и кросс-калибровка аппаратов были проведены в соответствии с технической документацией.

Подготовка фантома

Фантом NEMA IEC Body, состоящий из полого корпуса объемом 9,7 л, легочной цилиндрической вставки диаметром 51 мм и длиной 180 мм, заполненной пенопластовыми шариками, и 6 полых сфер с внутренним диаметром 10, 13, 17, 22, 28 и 37 мм [15,16], был заполнен водным раствором ^{18}F . Значения объемной активности ^{18}F , введенной в фантом, представлены в таблице 2.

После заполнения фантома проводилось сканирование последовательно на Vision и mCT. Фантом располагали на столе пациента в центре поля зрения аппаратов.

Параметры сканирования и реконструкции

Сканирование фантома NEMA IEC Body на каждом аппарате было проведено в режиме списка (Listmode)

¹ СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии». М.: Роспотребнадзор, 2015. [Sanitary Regulations and Standards СанПиН 2.6.1.3288-15 "Hygienic requirements for radiation safety during positron emission tomography". М.: Роспотребнадзор, 2015. (In Russ.)]; МУК 2.6.7.3651-20 «Методы контроля в ПЭТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты». Методические указания. М.: Роспотребнадзор, 2020 [МУК 2.6.7.3651-20 "Quality control methods in PET diagnostics for optimization of radiation protection". Роспотребнадзор, 2020 (In Russ.)]

Технические характеристики ПЭТ/КТ-аппаратов

Таблица 1

[Table 1

PET/CT specifications]		
Показатель [Indicator]	mCT	Vision
Материал кристаллов детекторов [Crystal material]	LSO	LSO
Размер кристаллов детекторов, мм [Crystal size, mm]	4×4×20	3,2×3,2×20
Преобразователь сигнала детекторов [Signal transducer]	Аналоговый фотоэлектронный умножитель (PMT) [Analogue photomultiplier tube]	Цифровой кремниевый фотоумножитель (SiPM) [Digital silicon photomultiplier]
Временное окно, нс [Time window, ns]	4,1	4,7
Временное разрешение, пс [Time resolution, ps]	540	214

Значения объемной активности, введенной в фантом NEMA IEC Body

Таблица 2

[Table 2

Activity concentrations injected into the NEMA IEC Body phantom]			
Показатель [Indicator]	Объемная активность на момент введения, кБк/мл [Activity concentration during phantom filling, kBq/ml]	Объемная активность на момент сканирования ($A_{\text{фактическое}}$), кБк/мл [Activity concentration during phantom scanning, kBq/ml]	
		mCT	Vision
Сферы [Spheres]	34,8	15,7	19,9
Общий объем [Background]	3,7	1,6	2,0

в 2 положениях кровати с перекрытием в области сфер и временем сбора данных на 1 положение кровати, равным 5 мин, с возможностью дальнейшей реконструкции изображений с различными параметрами. Коррекция ослабления была проведена по данным КТ-сканирования.

На аппарате mCT была выполнена реконструкция изображения согласно используемому клиническому протоколу: 2 итерации и 21 подмножество, ToF+PSF, фильтр Гаусс 5 мм, матрица 200×200. Для подбора оптимальных параметров реконструкции на аппарате Vision с целью гармонизации были выполнены следующие реконструкции изображения:

- 1) 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF+PSF, матрица 440×440;
- 2) 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF+PSF, фильтр Гаусс 5 мм, матрица 440×440;
- 3) 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF+PSF, фильтр Гаусс 6 мм, матрица 440×440;
- 4) 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF+PSF, фильтр Гаусс 7 мм, матрица 440×440;
- 5) 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF+PSF, фильтр Гаусс 5 мм, матрица 220×220;
- 6) 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF+PSF, фильтр Гаусс 6 мм, матрица 220×220;
- 7) 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF+PSF, фильтр Гаусс 7 мм, матрица 220×220;
- 8) 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF, фильтр Гаусс 5 мм, матрица 220×220;
- 9) 8 итераций и 5 подмножеств (4i5s), ToF + PSF, фильтр Гаусс 7 мм, матрица 440×440.

Анализ изображений фантома

Анализ изображений проводился на рабочей станции Syngo.via (Siemens). На каждой реконструированной се-

рии изображений фантома было определено максимальное значение объемной активности в сферах фантома ($A_{\text{измеренное}}$, кБк/мл). Области интереса были обрисованы с использованием КТ-изображения. Для анализа использовались максимальные значения объемной активности, определенные в областях интереса. На основании измеренных значений объемной активности для каждой сферы был определен коэффициент восстановления (КВ) согласно выражению (1):

$$KB = \frac{A_{\text{измеренное}}}{A_{\text{фактическое}}} \quad (1)$$

Для гармонизации количественной оценки между mCT и Vision в работе рассматривали следующий допустимый интервал расхождений, полученных КВ на аппарате Vision с аппаратом mCT: $KB \pm 10\%$ (20% интервал КВ).

Определение EQ фильтра

Перед определением EQ фильтра на рабочей станции Syngo.via было настроено отображение значений параметров изображений с EQ фильтром.

Определение EQ фильтра было проведено методом подбора оптимального значения, при котором измеренные максимальные значения объемной активности с EQ фильтром в сферах фантома на аппарате Vision имеют наименьшее отклонение от значений объемных активностей, введенных в сферы фантома, скорректированных на КВ, определенные на аппарате mCT (целевые значения). Оптимальное значение EQ фильтра было установлено при минимальной средней (по всем сферам) абсолютной процентной разнице значений объемной активности с EQ фильтром и целевых значений объемной активности, измеренных в каждой сфере фантома ($\Delta|A|$). Значением EQ фильтра может являться любое число больше нуля.

Схематично подбор оптимального EQ фильтра представлен на рисунке 1. Методика определения размера EQ фильтра подробно описана в [14].

Чтобы найти оптимальное значение, при котором количественные оценки на аппаратах Vision и mCT будут сопоставимы, были рассмотрены значения EQ фильтра: от 1 до 15 мм. При определении EQ фильтра на аппарате Vision была использована серия изображений, полученная при времени сбора данных на 1 положение кровати, равном 1,5 мин, с реконструкций: 4 итерации и 5 подмножеств (4i5s), ToF+PSF, матрица 440×440.

Используя значения накопленной объемной активности с EQ фильтром в сферах фантома, были определены значения KB и сопоставлены с 20% интервалом KB, полученным на аппарате mCT при времени сбора данных на 1 положение кровати, равном 2 мин (клинический протокол).

Анализ данных

Анализ данных был проведен с использованием программного обеспечения Microsoft Excel. Графическая обработка данных была проведена с использованием программного обеспечения Statistica 10.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены кривые зависимости KB от диаметра сферы фантома NEMA IEC Body, полученные для различных реконструкций изображения на аппарате Vision, и 20% интервал KB, полученный на аппарате mCT.

Значения KB, рассчитанные для реконструкции изображения: 4 итерации и 5 подмножеств, ToF+PSF, фильтр Гаусс 7 мм, матрица 220×220 (синяя кривая на рисунке 2),

полностью укладываются в 20% интервал. Значения KB, рассчитанные для реконструкции изображения: 4 итерации и 5 подмножеств, ToF+PSF, фильтр Гаусс 6 мм, матрица 440×440 (желтая кривая на рисунке 2) наиболее укладываются в 20% интервал. Для данной реконструкций значения KB на Vision для очагов с диаметром 10 мм и 13 мм выше на 2% верхней границы 20% интервала и ниже на 1% нижней границы 20% интервала соответственно. Однако значения KB, рассчитанные для реконструкции изображения, используемой на сегодняшний день в клинической практике: 4 итерации и 5 подмножеств, ToF+PSF, фильтр Гаусс 5 мм, матрица 440×440 (зеленая кривая на рисунке 2), укладываются в 20% интервал, за исключением очага с диаметром 10 мм, для которого значение KB выше на 20% верхней границы 20% интервала.

На рисунке 3 представлены зависимость средней (по всем сферам) абсолютной процентной разницы значений объемной активности ($\Delta|A|$) от значения EQ фильтра на аппарате Vision и кривые зависимости KB от диаметра сферы фантома, полученные без EQ фильтра (EQ = 0 мм) и после применения EQ фильтра на аппарате Vision, и 20% интервал KB на аппарате mCT. Значение EQ фильтра, при котором средняя (по всем сферам) абсолютная процентная разница значений объемной активности была минимальна, соответствовали 6 мм (см. рис. 3А). При значениях EQ фильтра от 5 до 7 мм средняя (по всем сферам) абсолютная процентная разница значений объемной активности на аппаратах также приближалась к минимальному значению.

EQ фильтр был применен для реконструкции, при которой KB на Vision, в особенности для очагов малых размеров, смещены вверх относительно KB на mCT (см. рис. 2).

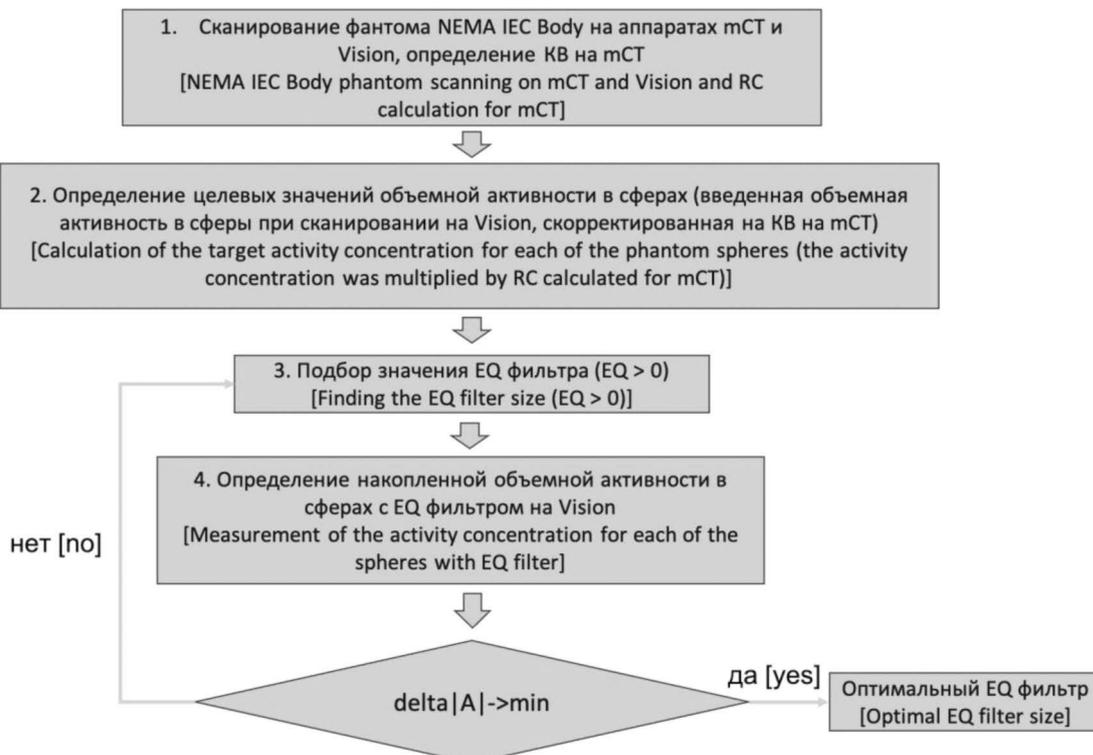


Рис. 1. Схема подбора оптимального значения EQ фильтра
[Fig. 1. Schema describing the choosing of optimal EQ filter]

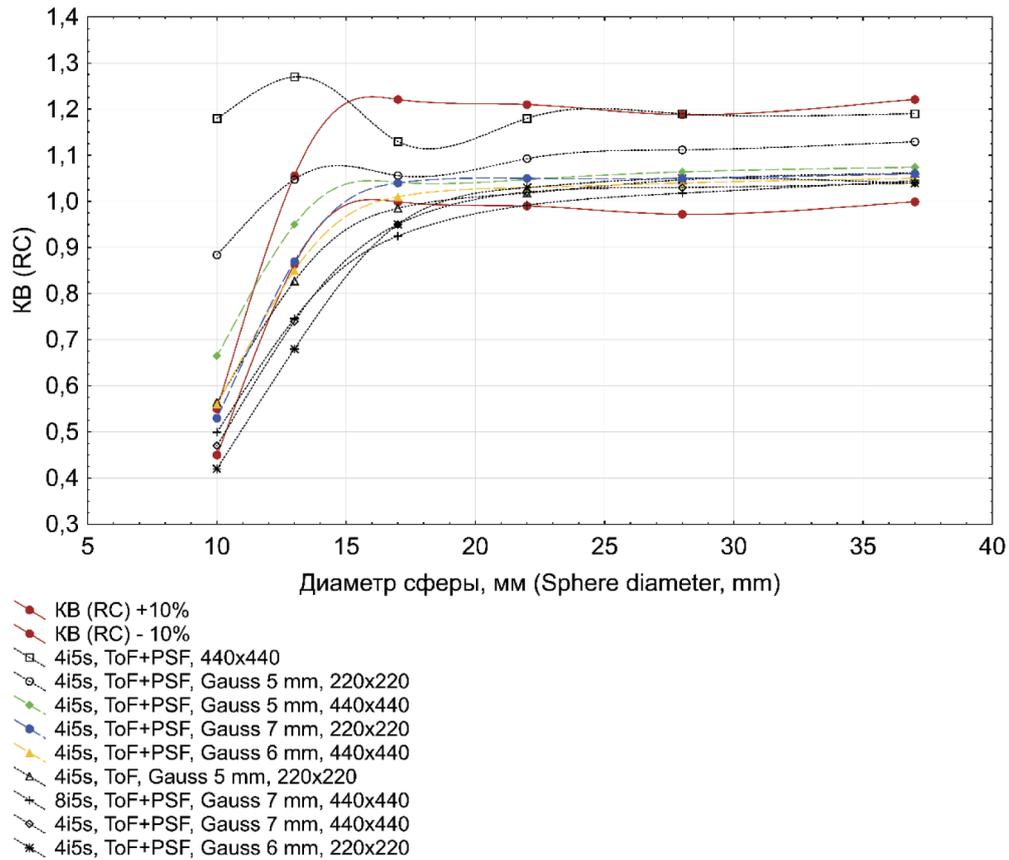


Рис. 2. Кривые зависимости KB от диаметра сферы фантома NEMA IEC Body (5 мин на 1 положение кровати)
[Fig. 2. RC – NEMA IEC Body phantom sphere diameter curves (5 min per bed)]

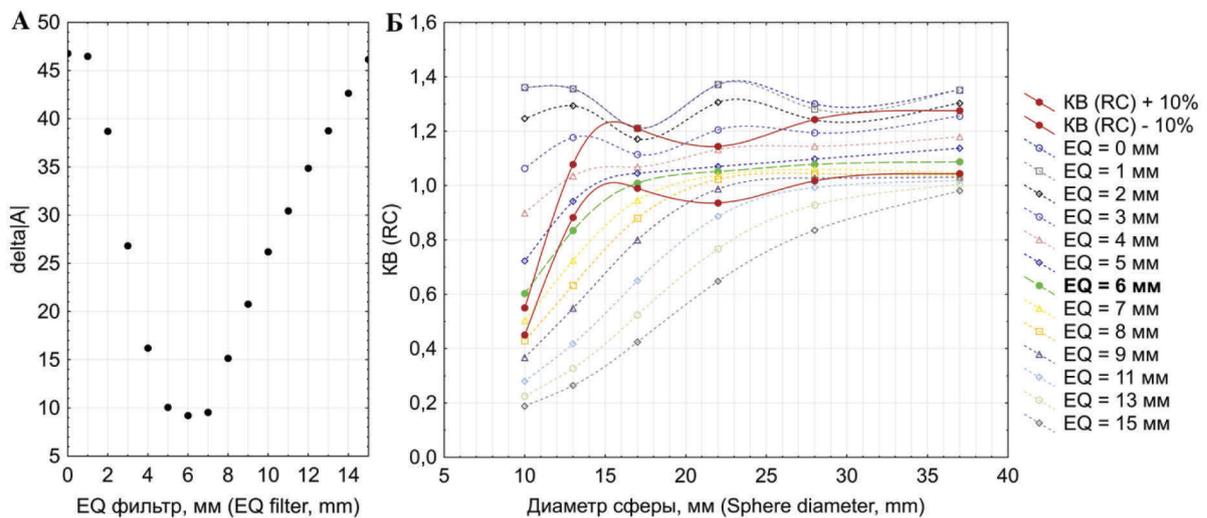


Рис. 3. Зависимость средней (по всем сферам) абсолютной процентной разницы значений объёмной активности ($\Delta|A|$) от значения EQ фильтра (А) и кривые зависимости KB от диаметра сферы фантома, полученные без EQ фильтра (EQ = 0) и после применения EQ фильтра (EQ \neq 0) на Vision, и 20% интервал KB на мСТ (Б)

[Fig. 3. Dependence of average of absolute deviations of activity concentration ($\Delta|A|$) measured for each NEMA IEC Body phantom on EQ filter (A) and RC without and with EQ filter – NEMA IEC Body phantom sphere diameter curves for Vision and 20% range of RC for mCT (B)]

Значения KB с EQ = 6 мм на Vision (см. рис. 3Б) укладываются в 20% интервал KB на мСТ, за исключением KB для очагов диаметром 10 и 13 мм. KB на аппарате Vision для

очага с диаметром 10 мм выше на 8% верхней границы 20% интервала, а для очага 13 мм ниже нижней границы на 6%. При применении фильтра EQ = 4 мм и EQ = 5 мм значения KB

укладываются в 20% интервал, за исключением очага диаметром 10 мм, но при этом средняя (по всем сферам) абсолютная процентная разница значений объемной активности не является минимальной. Применение фильтра EQ < 4 мм не позволяет снизить KB на Vision до необходимых значений для гармонизации с mCT, а применение EQ > 6 мм приводит к значениям KB ниже необходимого интервала.

Опубликованные на сегодняшний день исследования, в которых в качестве инструмента гармонизации применяют EQ.PET для гармонизации ПЭТ/КТ-аппаратов различных поколений, имеющих различные материалы кристаллов детекторов или отличающихся наличием или отсутствием технологий ToF и PSF [17-19], показали, что применение технологии EQ.PET, так же, как и метод гармонизации, который подразумевает использование нескольких протоколов реконструкции, позволяет приблизить количественные параметры ПЭТ-изображений. При этом технология EQ.PET экономит время реконструкции изображения и интерпретации результатов исследования. Однако данная технология реализована только у одного производителя, что затрудняет ее повсеместное применение. Стоит также отметить, что при гармонизации группы аппаратов (3 и более) необходимо определять значение EQ фильтра для каждого аппарата.

Рассматриваемые методы гармонизации позволили приблизить значения KB между аппаратами Vision и mCT, однако для обоих методов характерны различия между значениями KB для очагов малых размеров, что ограничивает возможности полной гармонизации количественной оценки между аппаратами. При этом более высокие значения KB на аппарате Vision указывают на лучшую выявляемость патологических очагов малых размеров. Стоит отметить, что оба метода гармонизации подразумевают применение фильтра Гаусса, оптимальное значение полной ширины на половине максимума которого для метода, основанного на использовании дополнительной реконструкции, было равно 7 мм, а для EQ.PET – 6 мм. С учетом того, что при определении EQ фильтра был использован протокол сбора данных с меньшим временем сканирования 1 положения кровати, значения KB, полученные при реконструкции изображения с применением фильтра Гаусса 6 мм, и KB, полученные с применением EQ фильтра 6 мм, имеют сопоставимые результаты. Таким образом, данные методы гармонизации являются сопоставимыми и могут быть взаимозаменяемыми.

Заключение

В настоящей работе были определены параметры протоколов реконструкции на аппарате Vision, которые позволяют свести к минимуму различия количественной оценки ПЭТ-изображений, полученных на аппаратах Vision и mCT, без изменения клинического протокола на mCT. Дополнительно было изучено влияние значения EQ фильтра на количественные параметры ПЭТ-изображений и определено оптимальное значение с целью гармонизации количественной оценки между аппаратами Vision и mCT без дополнительных реконструкций.

Использование гармонизированных параметров протоколов реконструкции согласно EANM подразумевает использование нескольких протоколов реконструкции для количественной и качественной оценок отдельно. Технология EQ.PET позволяет использовать реконструк-

цию, соответствующую наилучшей качественной оценке, при этом гармонизировать количественную оценку с помощью применения к тому же изображению дополнительного фильтра. Однако данная технология не является общедоступной и имеет ограничения при гармонизации более двух аппаратов. С этой точки зрения, использование гармонизированных параметров протоколов реконструкции является наиболее широко применимым методом. При этом данные методы могут быть взаимозаменяемыми.

Оба метода гармонизации количественной оценки позволяют получить сопоставимые значения для большинства очагов. Однако технология EQ.PET позволяет приблизить значения для большинства очагов, за исключением очагов малых размеров, что следует учитывать в клинической практике при проведении количественной оценки.

Ограничения работы

Настоящая работа выполнена на основании количественной оценки изображений фантома и не включает количественную оценку изображения пациента.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Петрякова А.В. – определение цели исследования, поиск и анализ литературы, интерпретация полученных результатов, написание текста.

Чипига Л.А. – научное руководство исследованием, интерпретация полученных результатов, написание текста.

Андреев Г.И. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Громова Е.А. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Катаева Г.В. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования, редактирование текста.

Ковалев К.В. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Онищенко С.С. – обсуждение результатов исследования, редактирование текста.

Безумова Е.Б. – обсуждение результатов исследования, редактирование текста.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. Rijnsdorp S., Roef M.J., Arends A.J. Impact of the Noise Penalty Factor on Quantification in Bayesian Penalized Likelihood (Q.Clear) Reconstructions of 68Ga-PSMA PET/CT Scans // *Diagnostics (Basel)*. 2021. Vol. 11, No 5. P. 847. doi: 10.3390/diagnostics11050847.
2. Mansor S., Pfaehler E., Heijtel D. et al. Impact of PET/CT system, reconstruction protocol, data analysis method, and repositioning on PET/CT precision: An experimental evaluation using an oncology and brain phantom // *Medical Physics*. 2017. Vol. 44, No 12. P. 6413-6424. doi: 10.1002/mp.12623.

3. Чипига Л.А., Звонова И.А., Рыжкова Д.В. и др. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 31-43. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43>.
4. Tsai Y.J., Liu C. Pitfalls on PET/CT Due to Artifacts and Instrumentation // Seminars in Nuclear Medicine. 2021. Vol. 51, No 6. P. 646-656. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2021.06.015.
5. Akamatsu G., Ishikawa K., Mitsumoto K. et al. Improvement in PET/CT image quality with a combination of point-spread function and time-of-flight in relation to reconstruction parameters // Journal of Nuclear Medicine. 2012. Vol. 53, No 11. P. 1716-22. doi: 10.2967/jnumed.112.103861.
6. Hsu D.F.C., Ilan E., Peterson W.T. et al. Studies of a Next-Generation Silicon-Photomultiplier-Based Time-of-Flight PET/CT System // Journal of Nuclear Medicine. 2017. Vol. 58, No 9. P. 1511-1518. doi: 10.2967/jnumed.117.189514.
7. Gnesin S., Kieffer C., Zeimpekis K. et al. Phantom-based image quality assessment of clinical 18F-FDG protocols in digital PET/CT and comparison to conventional PMT-based PET/CT // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging Physics. 2020. Vol. 7, No 1. <https://doi.org/10.1186/s40658-019-0269-4>
8. Taniguchi T., Akamatsu G., Kasahara Y. et al. Improvement in PET/CT image quality in overweight patients with PSF and TOF // Annals of Nuclear Medicine. 2015. Vol. 29, No 1. P. 71-7. doi: 10.1007/s12149-014-0912-z.
9. Alberts I., Sachpekidis C., Prenosil G. et al. Digital PET/CT allows for shorter acquisition protocols or reduced radiopharmaceutical dose in [18F]-FDG PET/CT // Annals of Nuclear Medicine. 2021. Vol. 35. P. 485-492. <https://doi.org/10.1007/s12149-021-01588-6>.
10. Boellaard R. Standards for PET image acquisition and quantitative data analysis. Journal of Nuclear Medicine. 2009. Vol. 50, Suppl. 1. P. 11S-20S. doi: 10.2967/jnumed.108.057182.
11. Lasnon C., Desmouts C., Quak E. et al. Harmonizing SUVs in multicentre trials when using different generation PET systems: prospective validation in non-small cell lung cancer patients // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2013. Vol. 40, No 7. P. 985-96. doi: 10.1007/s00259-013-2391-1.
12. Boellaard R., Delgado-Bolton R., Oyen W.J. et al. European Association of Nuclear Medicine (EANM). FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging: version 2.0 // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2015. Vol. 42, No 2. P. 328-54. doi: 10.1007/s00259-014-2961-x.
13. EARL FDG-PET/CT accreditation programme. In: Research for Life. European Association of Nuclear Medicine. URL: <https://earl.eanm.org/about/> (Дата обращения: 22.01.2024).
14. Matthew Kelly. EQ.PET: Achieving NEMA-referenced SUV Across Technologies. Siemens White paper: Munich, 2014.
15. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Катаева Г.В. и др. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в позитронно-эмиссионной томографии // Медицинская физика. 2019. Т. 82, № 2. С. 78-92.
16. NEMA Standards Publication NU 2-2018: Performance Measurements of Positron Emission Tomographs (PETS). National Electrical Manufacturers Association (NEMA): Washington, 2018.
17. Rubello D., Colletti P.M. SUV Harmonization Between Different Hybrid PET/CT Systems // Clinical Nuclear Medicine. 2018. Vol. 43, No 11. P. 811-814. doi: 10.1097/RLU.0000000000002284.
18. Ferretti A., Chondrogiannis S., Rampin L. et al. How to harmonize SUVs obtained by hybrid PET/CT scanners with and without point spread function correction // Physics in Medicine & Biology. 2018. Vol. 63, No 23. P. 235010. doi: 10.1088/1361-6560/aaee27.
19. Lasnon C., Salomon T., Desmouts C. et al. Generating harmonized SUV within the EANM EARL accreditation program: software approach versus EARL-compliant reconstruction // Annals of Nuclear Medicine. 2017. Vol. 31, No 2. P. 125-134. doi: 10.1007/s12149-016-1135-2.

Поступила: 26.01.2024 г.

Петрякова Анастасия Валерьевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; инженер по радиационной безопасности, Городская больница № 40 Курортного района. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: nastya.petryakova@gmail.com

ORCID 0000-0003-2663-9091

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

ORCID 0000-0001-9153-3061

Андреев Георгий Ильич – заместитель генерального директора по развитию и внедрению новых медицинских технологий Медицинского института Березина Сергея, Санкт-Петербург, Россия

Громова Елена Анатольевна – заведующая отделением тераностики Медицинского института Березина Сергея, Санкт-Петербург, Россия

ORCID 0000-0001-7723-8242

Катаева Галина Вадимовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиофармацевтических технологий Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации; инженер по радиобезопасности Медицинского института Березина Сергея, Санкт-Петербург, Россия

ORCID 0000-0003-0463-9832

Ковалев Кирилл Валерьевич – руководитель группы радиобезопасности Медицинского института Березина Сергея, Санкт-Петербург, Россия

Онищенко София Сергеевна – медицинский физик отделения радионуклидной терапии и диагностики Московского научно-исследовательского онкологического института имени П.А. Герцена – филиала Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия
ORCID 0000-0001-6107-4247

Безумова Елизавета Витальевна – инженер и медицинский физик отделения радионуклидной диагностики № 2 Национального медицинского исследовательского центра онкологии имени Н.Н. Блохина Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия
ORCID 0000-0002-3975-1130

Для цитирования: Петрякова А.В., Чипига Л.А., Андреев Г.И., Громова Е.А., Катаева Г.В., Ковалев К.В., Онищенко С.С., Безумова Е.В. Гармонизация количественной оценки между ПЭТ/КТ-аппаратами разных поколений: *Biograph mCT* и *Biograph Vision* // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 1. С. 44-53. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-44-53

Harmonisation of quantitative assessment between different generation of PET/CT: *Biograph mCT* and *Biograph Vision*

Anastasia V. Petryakova^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Georgy I. Andreev⁵, Elena A. Gromova⁵, Galina V. Kataeva^{3,5}, Kirill V. Kovalev⁵, Sofia S. Onischenko⁶, Elizaveta V. Bezumova⁷

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

² The City Hospital No 40 of the Kurortny District, Saint-Petersburg, Russia

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

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

⁵ Medical Institute named after Berezin Sergey, Saint-Petersburg, Russia

⁶ P. Hertsen Moscow Oncology Research Institute – branch of National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁷ National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

*The usage of modern positron emission tomography scanners, in particular with digital detectors, allows obtaining images with better quality, increases the detection of small pathological lesions, reduces scanning time and the activity administered to the patient which leads to a decrease of patient dose as well. However, the values of the quantitative image parameters shift upward, which can lead to significant differences with the quantitative assessment obtained on the previous generation device. In order to compare quantitative assessments obtained on different generations of PET/CT, it is necessary to harmonise quantitative image parameters and perform regular quality control. The aim of current work is the comparison of different methods for harmonization of quantitative image parameters on the example of harmonisation of two PET/CT: *Biograph mCT 128* and *Biograph Vision 600*. NEMA IEC Body phantom filled with ¹⁸F solution was scanned in Listmode in two bed positions with overlap in the sphere area during five minutes per bed position. Recovery coefficient used for harmonisation was measured for each sphere of the phantom. Harmonisation between *Vision* and *mCT* was performed using two methods: choosing of harmonised reconstruction parameters and EQ.PET technology. The acceptable divergence range between the recovery coefficients for *Vision* and for *mCT* is $\pm 10\%$ (20% range). The recovery coefficients measured for reconstruction: 4 iterations and 5 subsets, ToF+PSF, Gaussian 7 mm, matrix 220x220 completely fit within the 20% range. The recovery coefficients measured using EQ = 6 mm (optimal value) fit within the 20% range except the spheres with a diameter of 10 and 13 mm. Both harmonisation methods allow to approximate the quantitative assessment/ However, EQ.PET has limitations for the small lesions. Choosing harmonised reconstruction parameters is the most*

Anastasia V. Petryakova

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

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

widely used harmonisation method; the EQ.PET allows to harmonise quantitative assessment without the use of multiple reconstruction protocols and losses in visualization ability.

Key words: positron emission tomography, Biograph mCT 128, Biograph Vision 600, harmonization of quantitative assessment, reconstruction parameters, EQ.PET, NEMA IEC Body phantom.

Limitations of the work

Current work has been done based on phantom image quantitative assessment but not including patient image quantitative assessment.

Personal contribution of the authors

Petryakova A.V. – determination of the aim of the study, search and analysis of the literature, interpretation of the results, text writing.

Chipiga L.A. – scientific management of the study, interpretation of the results, text writing.

Andreev G.I. – analysis and interpretation of the results, discussion of the study results.

Gromova E.A. – analysis and interpretation of the results, discussion of the study results.

Kataeva G.V. – analysis and interpretation of the results, discussion of the study results, text editing.

Kovalev K.V. – analysis and interpretation of the results, discussion of the study results.

Onischenko S.S. – analysis and interpretation of the results, discussion of the study results, text editing.

Bezumova E.V. – analysis and interpretation of the results, discussion of the study results, text editing.

Conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

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

References

- Rijnsdorp S, Roef MJ, Arends AJ. Impact of the Noise Penalty Factor on Quantification in Bayesian Penalized Likelihood (Q.Clear) Reconstructions of 68Ga-PSMA PET/CT. *Scans. Diagnostics (Basel)*. 2021;11(5):847. doi: 10.3390/diagnostics11050847.
- Mansor S, Pfaehler E, Heijtel D, Lodge MA, Boellaard R, Yaqub M. Impact of PET/CT system, reconstruction protocol, data analysis method, and repositioning on PET/CT precision: An experimental evaluation using an oncology and brain phantom. *Medical Physics*. 2017;44(12): 6413-6424. doi: 10.1002/mp.12623.
- Chipiga LA, Zvonova IA, Ryzhkova DV, Menkov MA, Dolgushin MB. Levels of patient exposure and a potential for optimization of the pet diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 31-43. (In Russian).
- Tsai YJ, Liu C. Pitfalls on PET/CT Due to Artifacts and Instrumentation. *Seminars in Nuclear Medicine*. 2021;51(6): 646-656. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2021.06.015.
- Akamatsu G, Ishikawa K, Mitsumoto K, Taniguchi T, Ohya N, Baba S, et al. Improvement in PET/CT image quality with a combination of point-spread function and time-of-flight in relation to reconstruction parameters. *Journal of Nuclear Medicine*. 2012;53(11): 1716-22. doi: 10.2967/jnumed.112.103861.
- Hsu DFC, Ilan E, Peterson WT, Uribe J, Lubberink M, Levin CS. Studies of a Next-Generation Silicon-Photomultiplier-Based Time-of-Flight PET/CT System. *Journal of Nuclear Medicine*. 2017;58(9): 1511-1518. doi: 10.2967/jnumed.117.189514.
- Gnesin S, Kieffer C, Zeimpekis K, Papazyan JP, Guignard R, Prior JO, et al. Phantom-based image quality assessment of clinical 18F-FDG protocols in digital PET/CT and comparison to conventional PMT-based PET/CT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging Physics*. 2020;7(1). <https://doi.org/10.1186/s40658-019-0269-4/>.
- Taniguchi T, Akamatsu G, Kasahara Y, Mitsumoto K, Baba S, Tsutsui Y, et al. Improvement in PET/CT image quality in overweight patients with PSF and TOF. *Annals of Nuclear Medicine*. 2015;29(1): 71-7. doi: 10.1007/s12149-014-0912-z.
- Alberts I, Sachpekidis C, Prenosil G, Viscione M, Bohn KP, Mingels C, et al. Digital PET/CT allows for shorter acquisition protocols or reduced radiopharmaceutical dose in [18F]-FDG PET/CT. *Annals of Nuclear Medicine*. 2023;35: 485–492. <https://doi.org/10.1007/s12149-021-01588-6>.
- Boellaard R. Standards for PET image acquisition and quantitative data analysis. *Journal of Nuclear Medicine*. 2009;50(1): 11S-20S. doi: 10.2967/jnumed.108.057182.
- Lasnon C, Desmots C, Quak E, Gervais R, Do P, Dubos-Arvis C, et al. Harmonizing SUVs in multicentre trials when using different generation PET systems: prospective validation in non-small cell lung cancer patients. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2013;40(7): 985-96. doi: 10.1007/s00259-013-2391-1.
- Boellaard R, Delgado-Bolton R, Oyen WJ, Giammarile F, Tatsch K, Eschner W, et al. European Association of Nuclear Medicine (EANM). FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging: version 2.0. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2015;42(2): 328-54. doi: 10.1007/s00259-014-2961-x.
- EARL FDG-PET/CT accreditation programme. In: Research for Life. European Association of Nuclear Medicine. Available from: <https://earl.eanm.org/about/> (Accessed: 22.01.2024).
- Matthew Kelly. EQ.PET: Achieving NEMA-referenced SUV Across Technologies. Siemens White paper: Munich; 2014.
- Chipiga LA, Vodovатов AV, Kataeva GV, Ryzhkova DV, Dolgushin MB, Menkov MA, et al. Proposals of Quality Assurance in Positron Emission Tomography in Russia. *Meditsinskaya fizika = Medical Physics*. 2019;82(2): 78–92. (In Russian).
- NEMA Standards Publication NU 2-2018: Performance Measurements of Positron Emission Tomographs (PETS). National Electrical Manufacturers Association (NEMA); Washington; 2018.
- Rubello D, Colletti PM. SUV Harmonization Between Different Hybrid PET/CT Systems. *Clinical Nuclear Medicine*. 2018;43(11): 811-814. doi: 10.1097/RLU.0000000000002284.
- Ferretti A, Chondrogiannis S, Rampin L, Bellan E, Marzola MC, Grassetto G, et al. How to harmonize SUVs obtained by hybrid PET/CT scanners with and without point spread function correction. *Physics in Medicine & Biology*. 2018;63(23): 235010. doi: 10.1088/1361-6560/aaee27.

19. Lasnon C, Salomon T, Desmonts C, Dô P, Oulkhair Y, Madelaine J, et al. Generating harmonized SUV within the EANM EARL accreditation program: software approach versus EARL-compliant reconstruction. *Annals of*

Nuclear Medicine. 2017;31(2): 125-134. doi: 10.1007/s12149-016-1135-2.

Received: January 26, 2024

For correspondence: Anastasia V. Petryakova – junior researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; radiation safety engineer, The City Hospital No 40 of the Kurortny District (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: nastya.petryakova@gmail.com)

ORCID 0000-0003-2663-9091

Larisa A. Chipiga – Ph.D., research fellow, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; research fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0001-9153-3061

Georgy I. Andreev – deputy of general director for the development and implementation of new medical technologies, Medical Institute named after Berezin Sergey, Saint-Petersburg, Russia

Elena A. Gromova – head of theranostics department, Medical Institute named after Berezin Sergey, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0001-7723-8242

Galina V. Kataeva – Ph.D., leading researcher, Laboratory of Radiopharmaceutical Technologies, Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; radiation safety engineer, Medical Institute named after Berezin Sergey, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0003-0463-9832

Kirill V. Kovalev – head of the radiation safety group, Medical Institute named after Berezin Sergey, Saint-Petersburg, Russia

Sofia S. Onischenko – medical physicist of the radionuclide therapy and diagnostics department, P. Hertsen Moscow Oncology Research Institute National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

ORCID 0000-0001-6107-4247

Elizaveta V. Bezumova – engineer and medical physicist of the radionuclide diagnostic department No 2, National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

ORCID 0000-0002-3975-1130

For citation: Petryakova A.V., Chipiga L.A., Andreev G.I., Gromova E.A., Kataeva G.V., Kovalev K.V., Onischenko S.S., Bezumova E.V. Harmonisation of quantitative assessment between different generation of PET/CT: Biograph mCT and Biograph Vision. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 44-53. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-44-53

Современный статус референтной локации в базовой модели оценки доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненной территории после Чернобыльской аварии

А.Н. Барковский, В.П. Рамзаев

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 базовой модели, используемой до настоящего времени для оценки эффективной дозы внешнего облучения населения, которое проживает на радиоактивно загрязненной территории, референтной локацией является открытый участок целинной земли. Как показали наши полевые наблюдения, в настоящее время найти референтный истинно целинный участок земли весьма непросто в связи с тем, что на протяжении более чем 30 лет после Чернобыльской аварии многие целинные луга были перепаханы или рекультивированы. Без проведения специальных инструментальных исследований такие луговые площадки легко спутать с участками целинной почвы. Т.е. к настоящему времени, по сравнению с первыми годами после Чернобыльской аварии, ситуация с использованием открытых участков целинной почвы в качестве референтной локации кардинальным образом изменилась, что требует изменения подхода к выбору такой локации для модели и/или некоторому пересмотру структуры самой модели. Во-первых, в качестве референтной локации вместо открытых участков целинной почвы предложено и обосновано использование постоянно культивируемых огородных участков. Вторым путем к разрешению создавшейся трудной ситуации с наличием достаточного количества целинных участков может быть исключение из модели самого понятия «Референтная локация». В этом случае при расчете эффективной дозы внешнего облучения предлагается напрямую использовать значения нормированной на плотность загрязнения мощности дозы гамма-излучения в воздухе, экспериментально определенные в искомый промежуток времени для каждой из учитываемых в модели локаций.

Ключевые слова: внешнее облучение, доза, модель, референтная локация, целина, огород.

Описание проблемы

В базовой модели, используемой до настоящего времени для оценки эффективной дозы внешнего облучения ($E_{эфф}$) населения на радиоактивно загрязненной территории, референтной локацией является открытый целинный участок земли [1, 2]. Мощность дозы гамма-излучения в воздухе на высоте 1 м над поверхностью почвы от техногенного радионуклида ($MД_t$, нГр/ч или нЗв/ч), нормированная на плотность радиоактивного загрязнения почвы этим радионуклидом (A_t , кБк/м²) в референтной локации ($MД_{t-норм}$, (нГр/ч)/(кБк/м²) или (нЗв/ч)/(кБк/м²)), условно принимается за 1. Для количественной характеристики мощности дозы во всех остальных локациях, находящихся внутри населенного пункта (НП) (например, жилой дом, огород, улица) и в его ареале (пахотное поле, лес), используется безразмерная величина «Фактор места» (ФМ), которая равна отношению $MД_{t-норм}$ в выбранной локации к $MД_{t-норм}$ в референтной локации. Вычисление $E_{эфф}$ проводят с учетом ФМ, а также доли времени нахожде-

ния человека в каждой из учитываемых в модели локаций, обозначаемой как «Фактор поведения» (ФП, безразмерная величина) [1, 2].

Значения ФМ не являются постоянными, т.к. под влиянием совокупности природных и антропогенных факторов изменение $MД_t$ со временем в разных локациях происходит с разной скоростью [1]. Так, в период 1998–2012 гг. в Брянской области России среднее значение периода полураспада $MД_t$ на целинных участках почвы, в лесах, на пахотных полях, на огородах, в деревянных жилых домах и покрытых асфальтом улицах составило 16, 16, 21, 22, 17 и 18 лет соответственно [3]. В связи с этим необходимо периодически актуализировать значения ФМ посредством проведения представительных измерений $MД_t$ во всех локациях, учитываемых в модели оценки доз внешнего облучения. Однако с этим на территории Брянской области в последние пару десятилетий возникли проблемы. Как показали наши полевые наблюдения, в настоящее время найти референтный участок истин-

Рамзаев Валерий Павлович

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

но целинной земли весьма непросто в связи с тем, что на протяжении более чем 30 лет после Чернобыльской аварии многие целинные луга были перепаханы или рекультивированы. Без проведения специальных инструментальных исследований такие луговые площадки легко спутать с участками целинной почвы [4]. С аналогичной проблемой столкнулись исследователи [5] при поиске участков целинных земель в Гомельской области Республики Беларусь в 2016–2018 гг.

Т.е. к настоящему времени, по сравнению с первыми годами после Чернобыльской аварии, ситуация с использованием открытых участков целинной почвы в качестве референтной локации кардинальным образом изменилась, что требует изменения подхода к выбору такой локации для модели и/или некоторого пересмотра структуры самой модели.

Предлагаемые пути решения

Одним из возможных решений проблемы может быть использование локации «Огород» в качестве альтернативной референтной локации. Огороды (открытые участки постоянно культивируемой почвы) по ряду своих характеристик вполне соответствуют понятию референтной локации. Такие участки весьма многочисленны не только в сельских НП, но и в городах и поселках городского типа. Как правило, хозяева участков охотно допускают исследователей на свои огороды для проведения измерений; при этом может быть получена информация из первых уст об истории конкретного участка. Огороды расположены в пределах границ НП, и плотность радиоактивного загрязнения почвы на участках имеет строгую географическую привязку к официально установленному среднему значению плотности загрязнения почвы на всей территории НП, чего не скажешь о целинных участках, которые, как правило, находятся на некотором отдалении от НП. Важно и то обстоятельство, что огород находится в пределах жилой зоны НП, где человек проводит основную часть времени.

В дополнение к этим более или менее очевидным качественным характеристикам референтной локации важно иметь представление о статистической неопределенности оценки среднего значения $M_{T-норм}$ в этой локации. Чем меньше вариабельность исходных данных и чем больше объем выборки, тем выше точность оценки среднего. Коэффициент вариации или коэффициент изменчивости выборки (КВ, %), который представляет собой отношение среднеквадратичного отклонения (СКО) к среднему значению, является подходящей мерой для оценки такой неопределенности.

Мы провели сравнение вариабельности (изменчивости) $M_{T-норм}$ для целинных участков почвы и огородов в Брянской области. Источниками информации являлись публикации в реферируемых журналах, посвященные изучению радиационной обстановки в Брянской области после Чернобыльской аварии [1, 6–10]. Определение КВ проводили либо используя уже приведенные в публикациях значения средней величины и СКО, либо на основании вычислений этих параметров по индивидуальным значениям результатов измерений M_T и A_T в выборках. В рассматриваемый период (1996–2021 гг.) в расчет $M_{T-норм}$ принимался ^{137}Cs – единственный радионуклид, который учитывается

в настоящее время при оценке техногенного компонента дозы внешнего облучения населения в Брянской области.

Результаты вычислений КВ $M_{T-норм}$ для обеих локаций представлены в таблице 1, из которой видно, что вариабельность $M_{T-норм}$ на огородах меньше таковой на целинных участках. В определенной мере это объясняется тем, что вертикальное распределение ^{137}Cs на огородах, которое и определяет значение $M_{T-норм}$, носит довольно равномерный вид до глубины 15 см в связи с многократной перекопкой; это распределение достаточно стабильно в зависимости от времени (табл. 2). Измеренные значения M_T на огородах весьма жестко связано с плотностью их поверхностного радиоактивного загрязнения [9], и данный вид радиационного контроля может использоваться для экспрессной оценки плотности радиоактивного загрязнения НП.

В дополнение к меньшей пространственной изменчивости $M_{T-норм}$ огороды, по сравнению с целинными участками, в отдаленном периоде после аварии обладают еще одним преимуществом – меньшей изменчивостью $M_{T-норм}$ в зависимости от времени. По данным [3], в 1998–2012 гг. период полууменьшения M_T на целинных участках, расположенных вне НП и внутри НП, был в среднем равен 16 ± 2 и 15 ± 3 годам соответственно. Для огородов этот показатель был заметно больше – 22 ± 3 года. Это также связано со сложившимся за много лет равномерным вертикальным распределением ^{137}Cs на огородах в пределах верхних 15 см (см. табл. 2). Миграция радионуклида на большую глубину из нижней части вертикального распределения значительно меньше влияет на снижение мощности дозы над поверхностью почвы. Важно также отметить и то, что период полууменьшения M_T для огородов (22 года) близок к таковому для деревянных жилых домов (17 лет), пахотных полей (21 год) и заасфальтированных дворов и улиц (18 лет), что сделает более стабильными факторы места для последних 3 локаций при использовании огородов в качестве референтной локации.

Вторым путем к разрешению создавшейся трудной ситуации с наличием достаточного количества целинных участков может быть исключение из модели эффективной дозы внешнего облучения населения самого понятия «Референтная локация». Ранее в весьма представительном международном исследовании [6] было показано, что для корректной оценки текущей годовой эффективной дозы для населения Брянской области можно напрямую использовать набор значений $M_{T-норм}$ и ФП, экспериментально установленных для необходимого перечня локаций в искомый промежуток времени после Чернобыльской аварии. Отметим, что в Беларуси [11, 12] и Швеции [13] используют модели, в которых при оценке эффективной дозы внешнего облучения населения применительно к Чернобыльской аварии в явном виде также не присутствует понятие «Референтная локация».

Вполне вероятно, что вопросы, которые затронуты в данной дискуссии, станут актуальными в ближайшее время для территории Японии, загрязненной в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. Для оценки доз внешнего облучения населения на этой территории в модели НКДАР ООН [14], которая концептуально основана на «чернобыльской модели» [15], используется референтная локация – участок целинной почвы.

Таблица 1
Коэффициент вариации (КВ) нормированной мощности дозы гамма-излучения в воздухе от ^{137}Cs для локаций «Целина» и «Огород»

[Table 1
Coefficient of variation (CV) of the normalized dose rate of gamma radiation in air from ^{137}Cs for the “virgin land” and “kitchengarden” locations]

Год [Year]	Число участков [Number of plots]	КВ, % [CV, %]	Источник [Reference]
Целина [Virgin land]			
1999	33	26	[1]
1996–2001	38	21	[6]
2010	22	29	[10]
2015–2016	7	22	[7]
Огород [Kitchengarden]			
1996–2001	52	17	[6]
2020	10	7	[8]
2020–2021	92	16	[9]

Таблица 2
Вертикальное распределение относительной удельной активности (ОУА) ^{137}Cs в почве огородов в Брянской области в 1996–2001 гг. [6] и в 2020 г. [8]. ОУА в верхнем 0–5 см слое принята равной 1

[Table 2
Vertical distribution of relative activity concentration (RAC) of ^{137}Cs in soil of kitchengardens in the Bryansk region in 1996–2001 [6] and in 2020 [8]. The RAC in the upper 0–5 cm layer is taken equal to 1]

Глубина [Depth]	ОУА [RAC]	
	1996–2001 гг. (n = 52) [1996–2001 (n = 52)]	2020 г. (n = 10) [2020 (n = 10)]
0–5 см	1,00	1,00
5–10 см	1,00±0,20*	0,97±0,04*
10–15 см	0,98±0,19*	0,96±0,05*
15–20 см	0,73±0,22*	0,85±0,15*

* Средняя±стандартное отклонение [* – mean±standard deviation].

Заключение

Таким образом, в настоящее время существуют незрелые предпосылки для пересмотра статуса референтной локации в модели внешнего облучения населения, которое проживает на территории России, радиоактивно загрязненной в результате Чернобыльской аварии. В качестве референтной локации вместо открытых участков целинной почвы предложено и обосновано использование постоянно культивируемых огородных участков. Эти участки, в отличие от целинных участков местности, находятся в достаточном количестве в черте населенного пункта, однозначно определяются, для них характерна меньшая вариабельность $\text{МД}_{\text{т-норм}}$. В качестве альтернативы при расчете эффективной дозы внешнего облучения предлагается напрямую использовать значения $\text{МД}_{\text{т-норм}}$, экспериментально определенные для каждой из учитываемых в модели локаций.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Барковский А.Н. – концепция, написание рукописи.
Рамзаев В.П. – концепция, анализ литературных данных, редактирование рукописи.

Благодарность

В инициацию данного исследования значительный вклад внес Г.Я. Брук (ныне покойный) – заведующий лабораторией внутреннего облучения ФБУН НИИРГ имени профессора П.В. Рамзаева.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы частично осуществлялось по контракту № 0173100001419000019 с Роспотребнадзором.

Литература

1. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident // Radiation and Environmental Biophysics. 2002. Vol. 41, No. 10. P. 185–193.
2. Голиков В.Ю. Дозиметрия внешнего облучения населения: сравнение аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2020. Т.13, № 1. С. 27–37.
3. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Динамика уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в сельских

- населенных пунктах Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 38–46.
4. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Метод идентификации участков целинных почв с помощью портативного гамма-спектрометра-дозиметра // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 123–128.
 5. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A. et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018 // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 214–215. P. 106168.
 6. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R. et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 85. P. 205–227.
 7. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Корреляция между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесах, загрязненных ¹³⁷Cs: отдаленный период после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 37–46.
 8. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д *in situ* // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 56–65.
 9. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 85–95.
 10. Рамзаев В.П., Голиков В.Ю. Сравнение расчетных и измеренных значений мощности кермы в воздухе над почвой, загрязненной ¹³⁷Cs // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 42–51.
 11. Власова Н.Г. Оценка средней годовой эффективной дозы внешнего облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь для зонирования территории // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2018. Т. 20, № 2. С. 25–30.
 12. Эвентова Л.Н., Матарас А.Н., Батян А.Н. и др. Дозы облучения населения Беларуси вследствие аварии на Чернобыльской атомной электростанции на 2021–2025 гг. // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2022. № 4. С. 70–78.
 13. Isaksson M., Tondel M., Wälinder R., Rääf C. Modelling the effective dose to a population from fallout after a nuclear power plant accident—A scenario-based study with mitigating actions // PLoS ONE. 2019. Vol. 14, No. 4. P. e0215081.
 14. UNSCEAR—United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report. Volume II. Scientific Annex B: Levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: implications of information published since the UNSCEAR 2013 Report. United Nations. New York, 2022.
 15. Голиков В.Ю. Верификация модели внешнего облучения населения Японии после аварии на АЭС // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 31–40.

Поступила: 06.10.2023 г.

Барковский Анатолий Николаевич – руководитель Федерального радиологического центра, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Для цитирования: Барковский А.Н., Рамзаев В.П. Современный статус референтной локации в базовой модели оценки доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненной территории после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 54–59. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-54-59

Current status of reference location in the basic model for assessment of external radiation doses to the population living in radioactively contaminated areas after the Chernobyl accident

Anatoly N. Barkovsky, Valery P. Ramzaev

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

An open plot of virgin land is the reference location in the basic model used to date to estimate the effective dose of external exposure to the population living in a radioactively contaminated area. As our field observations in the Bryansk region of Russia have shown, at present it is very difficult to find truly reference plots of virgin land due to the fact that many virgin meadows were plowed or reclaimed for more than 30 years after the Chernobyl accident. Without special instrumental survey, such disturbed meadow areas can easily be confused with areas of virgin soil. Therefore, the situation with the use of open areas of virgin soil as the reference location has changed dramatically since the first years after the Chernobyl accident. It requires a change in the approach to choosing such a location for the model and/or some revision of the structure of the model itself. Firstly, we propose and justify the use of a permanently cultivated kitchen garden plot as the reference location. The second way to resolve the current difficult situation with the presence of a sufficient number of the virgin soil sites could be excluding the very concept of “reference location” from the model. In this case, when calculating the effective dose of external radiation, it is proposed to directly use the values of the gamma radiation dose rate in the air normalized to the ^{137}Cs contamination density of soil. The values of the normalized dose rate should be experimentally determined in the required time period for each of the locations taken into account in the model.

Key words: external radiation, effective dose, model, reference location, virgin soil, kitchen garden.

Authors' personal contribution

Barkovsky A.N. – conceptualization, writing the manuscript.

Ramzaev V.P. – conceptualization, analysis of literature data, editing the manuscript.

Acknowledgements

A significant contribution to the initiation of this research was made by G.Ya. Bruk (now deceased), Head of the Laboratory of Internal Exposure at Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was partially financed under contract No. 0173100001419000019 with Rospotrebnadzor.

References

- Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2002;41(10): 185–193.
- Golikov VYu. Dosimetry of external population exposure: a comparison of the Chernobyl and Fukushima accidents. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 27–37. (In Russian).
- Ramzaev VP, Barkovsky AN. Dynamics of decrease of the gamma dose rate in air in rural settlements of the Bryansk region (Russia) in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 38–46. (In Russian).
- Ramzaev VP, Barkovsky AN. Method for identifying areas of virgin soils using a portable gamma-spectrometer-dosimeter. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 123–128. (In Russian).
- Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M, et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;214–215: 106168.
- Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.
- Ramzaev VP, Barkovsky AN. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ^{137}Cs : the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 37–46. (In Russian).
- Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Validation of a method for *in situ* determination of ^{137}Cs soil contamination density in kitchen gardens using the portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 56–65. (In Russian).

Valery P. Ramzaev

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

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

9. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ¹³⁷Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 85–95. (In Russian).
10. Ramzaev VP, Golikov VYu. A comparison of measured and calculated values of air kerma rates from ¹³⁷Cs in soil. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 42–51. (In Russian).
11. Vlasova NG. Assessment of the average annual effective external exposure doses of the settlements of the Republic of Belarus for territory zoning. *Mediko-Biologicheskiye Problemy Zhiznedeyatel'nosti = Medical and Biological Problems of Life Activity*. 2018; 20(2): 25–30. (In Russian).
12. Eventova LN, Mataras AN, Batyan AN, Vlasova NG, Visenberg YuV. Exposure doses to the population of Belarus from the Chernobyl accident in 2021–2025. *Zhurnal Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;(4): 70–78. (In Russian).
13. Isaksson M, Tondel M, Wälinder R, Rääf C. Modelling the effective dose to a population from fallout after a nuclear power plant accident—A scenario-based study with mitigating actions. *PLoS ONE*. 2019;14(4): e0215081.
14. UNSCEAR—United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report. Volume II. Scientific Annex B: Levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: implications of information published since the UNSCEAR 2013 Report. United Nations. New York; 2022.
15. Golikov VYu. Verification of model of external population exposure in Japan after the accident at the “Fukushima-1” NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 31–40. (In Russian).

Received: October 06, 2023

Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Centre, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

For correspondence: Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: V.Ramzaev@mail.ru)

For citation: Barkovsky A.N., Ramzaev V.P. Current status of reference location in the basic model for assessment of external radiation doses to the population living in radioactively contaminated areas after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 54-59. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-54-59

Влияние изменчивости морфометрических параметров костей человека на неопределенность доз внутреннего облучения костного мозга от ^{90}Sr

Е.А. Шишкина^{1,2}, П.А. Шарагин¹, Е.И. Толстых¹

¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство России, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Для расчета доз внутреннего облучения красного костного мозга применяются вычислительные фантомы. Вычислительные фантомы МКРЗ созданы для стандартного человека с анатомическими характеристиками, типичными для среднестатистического индивидуума. Дозы, рассчитываемые на их основе, соответствуют среднепопуляционным величинам. Индивидуальная изменчивость вносит стохастическую компоненту неопределенности в оценку доз. Цель настоящей работы – оценка влияния индивидуальной изменчивости размеров костных структур на результаты дозиметрического моделирования. Созданы фантомы в виде простых геометрических фигур, заполненных трабекулярными структурами и костным мозгом (спонгиоза), покрытые снаружи кортикальным слоем. Геометрическая модель кости описывается параметрами, характеризующими линейные размеры, микроархитектуру спонгиозы (трабекулярная толщина, межтрабекулярное расстояние, доля костной ткани), а также толщину кортикального слоя. Варьируя эти параметры, получили наборы фантомов, имитирующих индивидуальную вариабельность геометрии костей. Рассчитывалась мощность поглощенной дозы в красном костном мозге от единичного распада $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ для случаев, когда изотопы распределены в объеме либо трабекулярной, либо кортикальной кости. Все оценки сделаны на примере фантома скелета взрослого мужчины. Индивидуальная вариабельность основных параметров вычислительных фантомов костных сегментов зависит от их размеров и составляет: а) для линейных размеров – 12–15%; б) для доли костной ткани – 22–24%; в) для кортикальной толщины – 21–23%. Это приводит к неопределенностям оценок мощностей доз, равным 21–25%.

Ключевые слова: вычислительные фантомы, внутреннее облучение, красный костный мозг, стронций, неопределенность, индивидуальная изменчивость.

Введение

Внутреннее облучение красного костного мозга (ККМ) остеотропными бета-излучателями, такими как ^{90}Sr , увеличивает риск лейкозов и других гематологических заболеваний [1–3]. Поэтому дозиметрия внутреннего облучения ККМ важна в исследовании отдаленных последствий радиоактивного загрязнения территорий Уральского региона, случившегося в середине прошлого века [4]. Для расчета доз внутреннего облучения ККМ применяется дозиметрическое моделирование переноса излучений в тканях костей скелета с использованием вычислительных фантомов [5]. Вычислительные фантомы МКРЗ созданы для стандартного человека с анатомическими характеристиками, типичными для среднестатистического индивидуума [5]. Дозы, рассчитываемые на их основе, будут соответствовать неким среднепопуляционным параметрам костей. Индивидуальная изменчивость

будет вносить стохастическую компоненту неопределенности в оценку доз. Оценка неопределенности дозиметрии костного мозга должна учитывать этот фактор влияния. Был использован параметрический подход SPSP (stochastic parametric skeleton dosimetry) [6–9]. В качестве параметров вычислительных фантомов используются физико-химические характеристики (химический состав сред и их плотность), морфометрические параметры (линейные макроразмеры, толщина кортикального слоя и характеристики микроархитектуры трабекулярной кости), а также распределение костного мозга между моделируемыми участками скелета. В предыдущем исследовании [10] мы показали, что вариации химического состава костной ткани в пределах физиологических показателей не приносят погрешность $> \pm 4\%$. Влияние плотности костной ткани на мощность дозы зависит от размера фантома и варьирует от 3% до 13%.

Шишкина Елена Анатольевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

Цель исследования – оценка влияния индивидуальной изменчивости морфометрических параметров костных структур на коэффициенты перехода от удельной активности ^{90}Sr в кортикальной и трабекулярной кости к мощности поглощенной дозы в ККМ.

Материалы и методы

В рамках настоящей работы мы анализируем сегменты костей предварительной версии фантома взрослого мужчины. Фантом взрослого мужчины включает 12 участков скелета с активным гемопоэзом: череп, шейный, грудной и поясничный отделы позвоночника, грудина, ребра, лопатки, ключицы, кости таза, крестец, проксимальные части плечевых и бедренных костей. Каждый из участков представлен несколькими сегментами [6, 9]. В качестве сегментов были выбраны фрагменты костей с относительно однородной микроархитектурой, которые можно было бы описать простой геометрической формой. На рисунке 1 показана сегментация на примере крестца.

Фантомы сегментов генерировались с помощью компьютерной программы «Trabecula» [11] на основе линейных размеров, толщины кортикального слоя (*Ct.Th*), средней толщины трабекул (*Tb.Th*), среднего межтрабекулярного расстояния (*Tb.Sp*), доли костной ткани (*BV/TV*) [9–12], элементного состава и плотности кости и костного мозга. В качестве линейных размеров фантомов, представляемых простыми геометрическими фигурами, использовались: 1) для прямоугольного параллелепипеда – длина, ширина и высота ($a \times b \times c$); 2) для эллипсоида – оси ($I \times m \times n$); 3) для цилиндра – оси эллиптического основания и высота ($I \times m \times H$); 4) для деформированного цилиндра – оси верхнего и нижнего эллиптических оснований и высота ($I_u \times m_u \times I_n \times m_n \times H$). Параметры оценивались на основе литературных источников так, чтобы соответствовать значениям, характерным для здоровых людей европеоидной и/или монголоидной этнической принадлежности. Подробно критерии включения данных в анализ и методы оценки средних значений параметров и стандартных

отклонений описаны в [9, 12]. Базовые фантомы сегментов (БФС) строились по средним значениям параметров. 12 дополнительных фантомов сегментов (ДФС) имитировали индивидуальную вариабельность. Предполагалось, что все линейные размеры имеют нормальное распределение и положительно коррелируют, а *Tb.Th* и *Tb.Sp* распределены логнормально и коррелируют отрицательно [9, 11]. Розыгрыш вариантов параметров проводился методом Монте-Карло в пределах 90% доверительного интервала соответствующего распределения (10% значений, относящихся к хвостам распределений, рассматривались как выбросы). Следует отметить, что *Tb.Sp* – это параметр, который чувствителен к методу измерения (обычно на основе двумерных изображений) и в прямую не аппроксимируемый на трехмерное представление. В результате *BV/TV* сгенерированной модели может отличаться от реалистичных и надежно измеряемых значений, полученных из литературы. Поэтому была реализована специальная многоступенчатая процедура калибровки *Tb.Sp* [6], которая приводит *BV/TV* сгенерированной модели к соответствующему параметру, определяемому пользователем (для БФС), либо к заданному диапазону возможных значений *BV/TV* (для ДФС). Фантомы генерируются в воксельном представлении с разрешением, равным $0,7 \times Tb.Th$.

Перенос излучений моделировали с помощью MCNP6.2. Хотя есть данные, что гематопозитические створчатые клетки обнаруживаются преимущественно вблизи поверхностей костных трабекул [13, 14], современная концепция радиологической защиты [5] предполагает, что они распределены равномерно в объеме костномозговых полостей с ККМ. В этом приближении удельная поглощенная энергия в костном мозге будет равна таковой в ККМ для электронов ^{90}Sr в равновесии с дочерним ^{90}Y ($E=0,565 \text{ МэВ}$, $Q=2,28 \text{ МэВ}$). Таким образом мишенью в наших расчетах выступал весь костный мозг. Спектры излучения $^{89,90}\text{Sr}$ и ^{90}Y взяты из информационной системы JANIS 4.1 [15]. Распады ^{90}Sr и ^{90}Y моделируются с равной

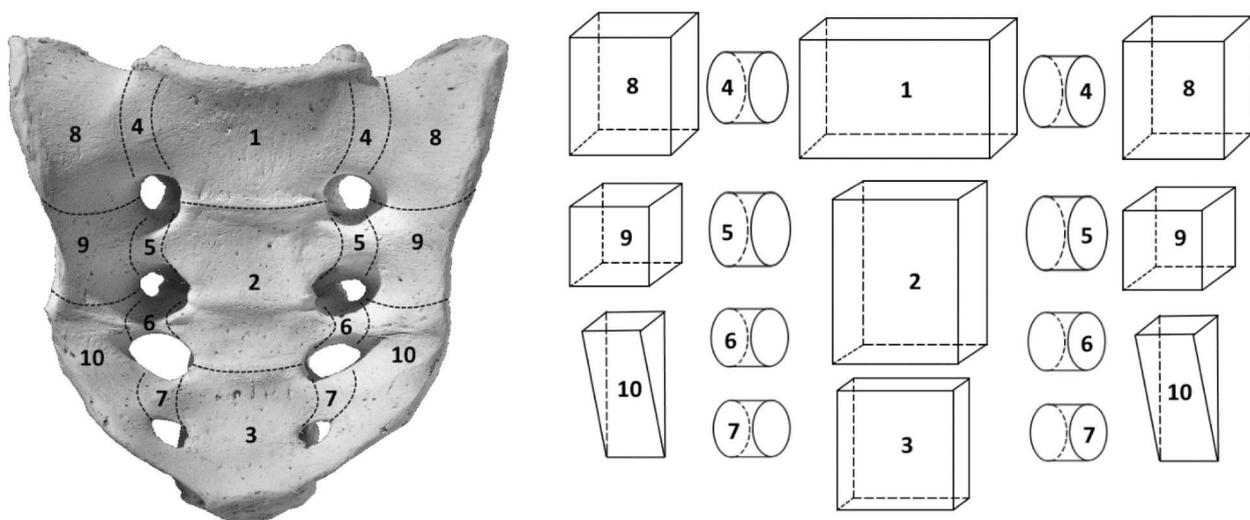


Рис. 1. Сегментация крестца. Слева пунктирными линиями показаны границы, по которым крестец разделялся на сегменты; справа показаны геометрические приближения формы; цифрами обозначены сегменты и соответствующие им модели
[Fig. 1. Segmentation of sacrum. The dotted lines are the boundaries which divide sacrum into segments are on the left; the geometry approximation of the shape are on the right; the numbers indicate the segments and their corresponding models]

вероятностью. Рассчитывалась средняя удельная поглощенная энергия от одного электрона спектров $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ отдельно для источника, распределенного в трабекулярном (Т) и кортикальном (К) объемах кости. Элементный состав (массовые доли) и плотность тканей кости принят согласно Публикации 89 МКРЗ [16] (табл. 1).

Таблица 1

Элементный состав (массовые доли) и плотность тканей кости

[Table 1

Element composition (mass fractions) and densities of bone tissues]

Номер элемента [Element number]	Элемент [Element]	Кость [Bone]	Костный мозг [Bone marrow]
1	H	0,035	0,105
6	C	0,16	0,414
7	N	0,042	0,034
8	O	0,445	0,439
11	Na	0,003	0,001
12	Mg	0,002	0,002
15	P	0,095	0,002
16	S	0,003	0,002
20	Ca	0,215	-
Плотность, г см ⁻³ [Density, g cm ⁻³]		1,9	0,98

Количество историй исходных частиц составило не менее 4 000 000; статистическая погрешность <1%. Для каждого i-го сегмента рассчитывалась $\bar{\epsilon}_i(KM \leftarrow s)$ – поглощенная энергия в костном мозге (КМ) при единичном распаде изотопа в источнике s. Полученные результаты преобразовали в коэффициент перехода, $DF_i(KM \leftarrow s)$, от единичной удельной активности ^{90}Sr (материнского радионуклида) в s к мощности поглощенной дозы в КМ i-го сегмента (далее будем кратко называть «Коэффициент перехода») (уравнение 1).

$$DF_i(KM \leftarrow s) = \bar{\epsilon}_i(KM \leftarrow s) \frac{m_s}{m_{KM}}, \quad (1)$$

где КМ – красный костный мозг; m_s и m_{KM} – массы ткани-источника и КМ; DF – коэффициент перехода, (Гр/с)/(Бк/г).

Неопределенность оценки $DF_i^{B\Phi C}(KKM \leftarrow s)$, рассчитанного по средним морфометрическим параметрам сегмента i, оценивали как относительное среднеквадратическое отклонение от 12 аналогичных оценок, полученных с помощью набора ДФС (уравнение 2).

$$CV_i = \sqrt{\frac{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} (DF_{i,j}^{ДФС}(KKM \leftarrow s) - DF_i^{B\Phi C}(KKM \leftarrow s))^2}{DF_i^{B\Phi C}(KKM \leftarrow s)}}} \quad (2)$$

Результаты и обсуждение

Чем меньше размер сегмента, тем больше вероятность того, что электрон покинет спонгиозу. Поглощение энергии в КМ сегментов с большими размерами губчатой кости менее чувствительно к размерам и форме. В работах [17, 18] для разделения сегментов разной геометрической формы на «маленькие» или «большие» было введено понятие характеристических размеров спонгиозы: длина, ширина и высота условного прямоугольного

параллелепипеда, характеризующего размеры спонгиозы. Если спонгиоза имела форму деформированного цилиндра, то длины ребер основания характеристической фигуры были равны средним значениям осей верхнего и нижнего оснований, а высота характеристической фигуры равна высоте модели. Согласно [17], к «маленьким» относятся модели, где хотя бы один из характеристических размеров (l_k) < 5 длин свободного пробега электронов со средней энергией спектра излучения, (l_k) < $5 \times \lambda_e(\bar{E})$. Всего в рассматриваемом фантоме скелета оказалось 28 малых сегментов и 39 больших. На рисунке 2 показаны распределения коэффициентов вариации (CV) морфометрических параметров больших и малых моделей.

Как видно из рисунка 2а, линейные размеры малых сегментов варьируют несколько сильнее ($\overline{CV}=15\%$; максимум – 31%), чем у больших ($\overline{CV}=12\%$; максимум – 15%). Распределения CV не соответствует нормальному закону (тест Шапиро – Уилка, $p < 0,05$). Разница в медианных значениях (U-критерий) между двумя группами оказалась больше, чем можно было бы ожидать от случайной ошибки ($p = 0,004$). Коэффициенты вариации BV/TV для больших и малых сегментов в среднем составляли 22% и 24% соответственно. Распределения визуально не отличаются (см. рис. 2б) и медианные значения практически совпали (согласно U-критерию, $p=0,679$).

Средние значения CV для *Ct.Th* (см. рис. 2с) больших и малых сегментов имеют близкие значения и составляют 21% и 23% соответственно. Однако медианные значения, характерные для малых сегментов, в 1,5 раза меньше таковых у больших. Разница статистически значима (согласно U-критерию, $p = 0,036$). В таблице 2 показано сравнение медианных значений и 50% интервалов распределений CV, характерных для параметров больших и малых фантомов сегментов.

На рисунке 3 представлены распределения CV для больших и малых моделей.

Средние значения CV для $DF_i(KM \leftarrow T)$ (см. рис. 3а) больших и малых сегментов равны 19% и 26% соответственно. Разница в медианных значениях статистически значима ($p = 0,001$). Средние значения CV для $DF_i(KM \leftarrow K)$ (см. рис. 3б) больших и малых сегментов равны 19% и 25% соответственно. Разница в медианных значениях статистически значима ($p = 0,031$). Иными словами, неопределенность коэффициентов перехода для больших сегментов в 1,3 раза ниже, чем таковая для малых.

Мы сравнили вариабельность параметров модели и неопределенность коэффициентов переходов. Для малых сегментов наблюдались слабые корреляции (по Спирману) между CV для: BV/TV и $DF_i(KM \leftarrow T)$ ($r_s=0,383$; $p=0,044$); линейных размеров и $DF_i(KM \leftarrow K)$ ($r_s=0,411$; $p=0,030$). Для больших сегментов наблюдались более значимые корреляции между CV для: BV/TV и $DF_i(KM \leftarrow T)$ ($r_s=0,526$; $p=0,0006$); *Ct.Th* и $DF_i(KM \leftarrow K)$ ($r_s=0,624$; $p=0,00002$). При этом у больших сегментов неопределенности коэффициентов перехода несколько ниже неопределенностей параметров, с которыми они коррелируют, а для малых сегментов имеет место обратная тенденция (см. табл. 2).

Оценка доз на КМ (и их неопределенностей) в локальных сегментах имеет ограниченную практическую значимость. Обычно оценивается доза на весь КМ.

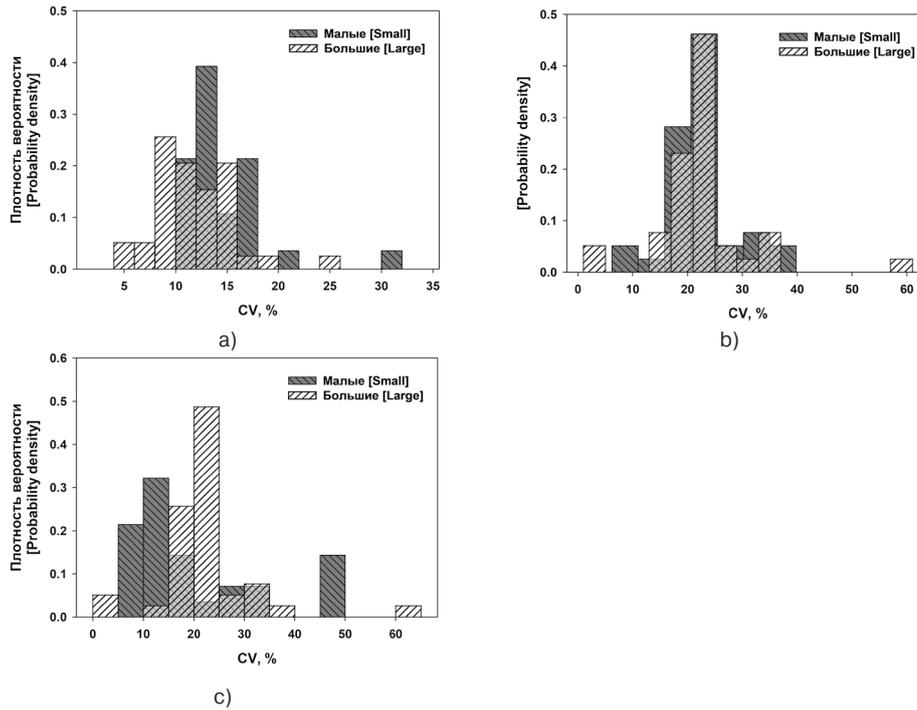


Рис. 2. Распределение коэффициентов вариации (CV) как показателей индивидуальной изменчивости морфометрических параметров больших (n=39) и малых (n=28) сегментов: а) линейные размеры; б) BV/TV; в) Ct.Th
[Fig. 2. Distribution of coefficients of variation (CV) indicating the individual variability of morphometric parameters of large and small segments: a) linear dimensions; б) BV/TV; в) Ct.Th]

Таблица 2

Характеристики распределений коэффициентов вариации параметров фантомов сегментов и соответствующих коэффициентов перехода. Q1–Q3 – первая и третья квартили

[Table 2

Characteristics of distributions of coefficients of variation for segment phantom parameters and corresponding dose factors. Q1–Q3 – first and third quartiles]

Показатели [Indicators]	Малые сегменты [Small segments]		Большие сегменты [Large segments]	
	Медиана, % [Median, %]	Q1–Q3, %	Медиана, % [Median, %]	Q1–Q3, %
<i>Параметры [Parameters]</i>				
Линейные размеры* [Linear dimensions]	13	12–16	11	9–14
BV/TV	21	18–34	21	17–23
Ct.Th*	13	12,8–28	20	8–30
<i>Коэффициенты перехода [Dose factors]</i>				
DF _i (KKM←T)*	23	19–30	18	15–22
DF _i (KKM←K)*	23	15–28	17	12–24

* Различие между большими и малыми сегментами статистически значимо согласно критерию суммы рангов Манна – Уитни (p<0,04).

[The difference between large and small segments is statistically significant according to the Mann – Whitney rank sum test (p<0.04)].

Поэтому рассчитываются средневзвешенные коэффициенты перехода для каждого из 12 основных участков скелета (уравнение 3), чтобы потом усреднить их по скелету (уравнение 4).

$$DF_k(KKM \leftarrow s) = \sum_{i=1}^{n_k} w_{k,i} DF_{k,i}(KKM \leftarrow s); w_{k,i} = \frac{m_{KKMk,i}}{\sum_{i=1}^{n_k} m_{KKMk,i}}, \quad (3)$$

где DF_k(KKM←s) – средний по k-му участку скелета коэффициент перехода; DF_{k,i}(KKM←s) – коэффициент пе-

рехода i-го сегмента k-го участка скелета; ω_{k,i} – весовой коэффициент; n_k – количество сегментов в участке скелета k; m_{KKMk,i} – масса костного мозга.

$$\sigma_{DF_k(KKM \leftarrow s)} = \sum_{i=1}^{n_k} w_{k,i} \sigma_{DF_{k,i}(KKM \leftarrow s)}, \quad (4)$$

где σ_{DF_k(KKM←s)} – абсолютное значение неопределенности коэффициента перехода для k-го участка скелета, σ_{k,i} – неопределенность i-го сегмента.

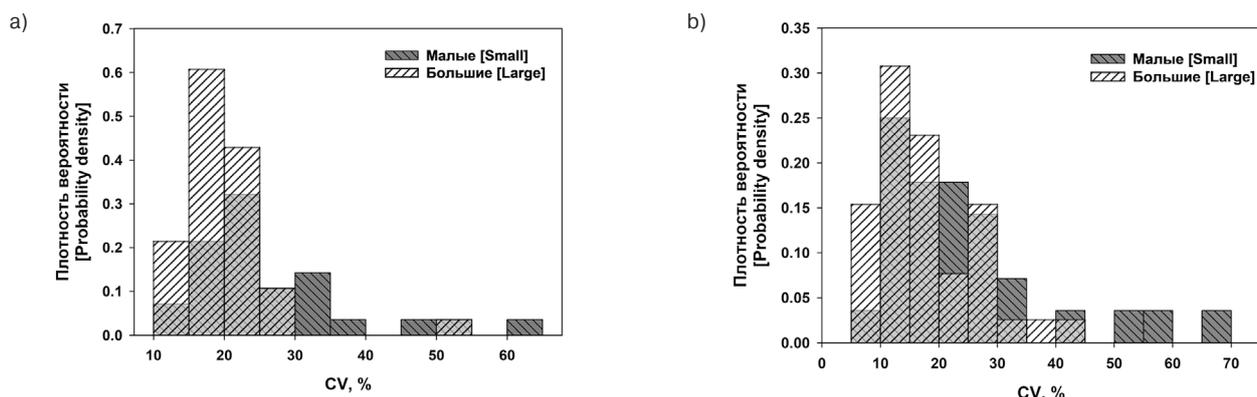


Рис. 3. Распределение коэффициентов вариации (CV) как показателей неопределенности (a) $DF_i(KKM←T)$ и (b) $DF_i(KKM←K)$ для больших (n=39) и малых (n=28) сегментов
[Fig. 3. Distribution of coefficients of variation (CV) indicating the uncertainty of (a) $DF_i(AM←T)$ and (b) $DF_i(AM←C)$ for large and small segments]

Результаты представлены в таблице 3. На этапе усреднения $DF_k(KKM←s)$ по скелету в качестве взвешивающих коэффициентов используются доли ККМ (w_k) в соответствующих участках [7, 9]. Индивидуальная вариабельность распределения ККМ между участками скелета оценена по данным [19]. Для оценки неопределенности среднего по скелету $DF(KKM←s)$ был использован закон распространения неопределенностей. Весовые

коэффициенты – величины нормированные. Это связанные параметры. Однако поскольку количество участков скелета k велико, то ковариацией неопределенностей этого параметра можно пренебречь. Размеры костей разных участков скелета не являются независимыми. Существуют исследования, демонстрирующие корреляцию линейных размеров костей скелета и их масс, а также размеров костей и роста человека [20, 21].

Таблица 3

Коэффициенты перехода от удельной активности ^{90}Sr в трабекулярной и кортикальной кости к мощностям доз в ККМ и их неопределенности как для отдельных участков, так и для скелета в целом; w_k и δ_{w_k} – доля ККМ в участке скелета и ее индивидуальная вариабельность согласно [19]

[Table 3

The dose factors to convert the specific activity of ^{90}Sr in the trabecular and cortical bone into dose rates in AM and their uncertainties for both separate sites and the entire whole skeleton; w_k and δ_{w_k} – site-specific fraction of AM and its individual variability according to [19]

К	Участок скелета [skeleton sites]	w_k	$\delta_{w_k}, \%$	$DF(KKM←T),$ (мГр/год)/(Бк/г) [$DF(AM←T),$ (mGy/y)/(Bq/g)]	$\delta_{DF_k(KKM←T)}, \%$ [$\delta_{DF_k(AM←T)}, \%$]	$DF(KKM←K),$ (мГр/год)/(Бк/г) [$DF(AM←C),$ (mGy/y)/(Bq/g)]	$\delta_{DF_k(KKM←K)}, \%$ [$\delta_{DF_k(AM←C)}, \%$]
1	Череп [skull]	0,06	37	2,72	20	1,15	47
2	Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	0,04	29	1,42	15	0,84	21
3	Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	0,18	14	1,29	22	0,47	19
4	Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	0,16	16	1,15	21	0,27	24
5	Крестец [Sacrum]	0,07	24	1,20	20	0,42	15
6	Лопатки [Scapula]	0,05	17	1,18	20	0,64	20
7	Рёбра [Ribs]	0,10	17	1,07	29	0,99	14
8	Ключицы [Clavicle]	0,01	17	1,58	26	0,54	19
9	Грудина [Sternum]	0,02	39	1,11	24	0,53	16
10	Кости таза [Pelvis]	0,23	13	1,47	15	0,42	34
11	Проксимальная часть бедра [Proximal femur]	0,06	42	0,98	12	0,29	12
12	Проксимальная часть плеча [Proximal humerus]	0,04	53	0,52	51	0,26	13
	Весь скелет [Whole skeleton]			1,32	21	0,52	25

Соответственно коррелированными являются соотношение масс костной ткани и костного мозга в разных участках скелета и, соответственно, коэффициенты перехода (см. уравнение 1). Принимая коэффициент корреляции равным 0,5 (средняя корреляция масс различных костей согласно [20]), выражение для абсолютной стандартной неопределенности $DF(KKM \leftarrow s)$ будет иметь вид (уравнение 5):

$$\sigma^2 = \sum_{k=1}^{12} \left[\left(\frac{\partial(w_k DF_k(KKM \leftarrow s))}{\partial w_k} \right)^2 \sigma_{w_k}^2 + \left(\frac{\partial(w_k DF_k(KKM \leftarrow s))}{\partial DF_k(AM \leftarrow s)} \right)^2 \sigma_{DF_k}^2 \right] + \sum_k \sum_{l(i \neq k)}^{12} 0,5 \sigma_k \sigma_l = \sum_{k=1}^{12} [DF_k(KKM \leftarrow s)^2 w_k^2 (\delta_{w_k}^2 + \delta_{DF_k}^2)] + \sum_k \sum_{l(i \neq k)}^{12} 0,5 \sigma_k \sigma_l,$$

где $\sigma_k = w_k DF_k(AM \leftarrow s) \sqrt{(\delta_{w_k}^2 + \delta_{DF_k}^2)}$ абсолютная стандартная неопределенность произведения $w_k DF_k(AM \leftarrow s)$.

Как видно из таблицы 3, неопределенность коэффициентов перехода, ассоциируемая с индивидуальной вариабельностью морфометрических параметров и распределения костного мозга между участками скелета, для $DF(KKM \leftarrow T)$ составляет 21%, а для $DF(KKM \leftarrow K)$ – 25%. Следует заметить, что данная оценка является консервативной.

Заключение

Индивидуальная вариабельность морфометрических параметров вычислительных фантомов костных сегментов зависит от размера сегментов и в среднем составляет: а) для линейных размеров – 12–15%; б) для BV/TV – 22–24%; в) для $Ct.Th$ – 21–23%. Размеры костей скелета человека варьируют в пределах 12–15%. Индивидуальная вариабельность приводит к неопределенностям $DF_i(KKM \leftarrow s)$ порядка 19% для сегментов больших размеров и ~25% для сегментов малых размеров. При усреднении по скелету относительные стандартные неопределенности, ассоциируемые с индивидуальной вариабельностью морфометрических параметров, отличаются для $DF(KKM \leftarrow T)$ и $DF(KKM \leftarrow K)$ и составляют 21% и 25% соответственно. Помимо вариабельности морфометрических параметров, имеет место вариабельность физико-химических параметров (плотность и химический состав) [14]. Их влияние на неопределенность коэффициентов перехода составляет:

- 5% как для $DF(AM \leftarrow TBV)$, так и для $DF(AM \leftarrow CBV)$ моделей больших сегментов;
- 7% для $DF(AM \leftarrow TBV)$ моделей малых сегментов;
- 14% для $DF(AM \leftarrow CBV)$ моделей малых сегментов.

Однако их вклад в общую неопределенность небольшой. Объединение всех источников индивидуальной вариабельности приводит к неопределенности $DF(AM \leftarrow TBV)$ и $DF(AM \leftarrow CBV)$ в 23% и 29% соответственно. Как уже отмечалось выше, эти неопределенности оценены для фантома скелета взрослого мужчины, где большинство участков скелета описаны большими фантомами, для которых характерна меньшая чувствительность коэффициентов перехода к вариабельности параметров. Фантомы скелета новорожденных и годовалых детей [22, 23] составлены преимущественно из малых сегментов. Для них неопределенность дозиметрии костного мозга может быть несколько выше.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Шишкина Е.А. – разработка концепции, написание статьи, дизайн исследования.

Шарагин П.А. – вычисления, редактирование статьи.

Толстых Е.И. – разработка концепции, редактирование статьи.

Благодарность

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» НИОКР.

Литература

1. Krestinina L.Yu., Davis F.G., Schonfeld S. et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007 // *British Journal of Cancer*. 2013. Vol. 109. P. 2886–2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614.
2. Пелевина И.И., Аклеев А.В., Когарко И.Н. и др. Радиационно-химическое воздействие ионизирующего излучения на организм и генотоксические нарушения системы крови // *Химическая физика*. 2021. Т. 40, № 12. С. 48–55. DOI: 10.31857/S0207401X2112013X
3. Akleyev A.V. Early signs of chronic radiation syndrome in residents of the Techa riverside settlements // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2021. Vol. 60, № 2. P. 203–212. DOI: 10.1007/s00411-021-00897-8.
4. Аклеев А.В., Аклеев А.А., Дегтева М.О. и др. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Челябинск: ОАО Челябинское полиграфическое объединение Книга, 2016. 400 с.
5. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External radiation Exposures. ICRP Publication 116 // *Annals of the ICRP*. 2010. Vol. 40 (2–5). P. 1–257. DOI: 10.1016/j.icrp.2011.10.001. Erratum in: *Ann ICRP*. 2015 Vol. 44(1). P.128–34.
6. Zalyapin V.I., Timofeev Yu.S., Shishkina E.A. A parametric stochastic model of bone geometry // *Bulletin of Southern Urals State University. Issue «Mathematical Modelling. Programming & Computer Software» (SUSU MMCS)*. 2018. Vol. 11, № 2. P. 44–57. DOI: 10.14529/mmp180204.
7. Shishkina E.A., Zalyapin V.I., Timofeev Yu.S. et al. Parametric stochastic model of bone structures to be used in computational dosimetric phantoms of human skeleton // *Radiation and Applications*. 2018. Vol. 3, № 2. P. 133–137. DOI: 10.21175/RadJ.2018.02.022.
8. Дегтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И. и др. Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов // *Радиационная Гигиена*. 2019. Т. 12, № 2. С. 66–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75
9. Degteva M.O., Tolstykh E.I., Shishkina E.A. et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description // *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16(10) P. e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605.
10. Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Толстых Е.И. Неопределенность оценки доз в костном мозге от $^{89,90}\text{Sr}$ из-за изменчивости химического состава и плотности кости // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 2. С. 32–43. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-32-43

11. Shishkina E.A., Timofeev Y.S., Volchkova A.Yu. et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry // *Health Physics*. 2020. Vol. 118, № 1. P. 53-9. DOI: 10.1097/hp.0000000000001127.
12. Толстых Е.И., Шарагин П.А., Шишкина Е.А. и др. Анатомо-морфологический базис для дозиметрического моделирования трабекулярной кости человека с использованием стохастического параметрического подхода // *Клинический вестник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна*. 2022. № 3. С. 25 – 40. DOI: 10.33266/2782-6430-2022-3-25-40
13. Watchman C.J., Bourke V.A., Lyon J.R. et. al. Spatial distribution of blood vessels and hematopoietic stem and progenitor cells within the marrow cavities of human cancellous bone // *Journal of Nuclear Medicine*. 2007. Vol. 48, № 4. P. 645-654. DOI: 10.2967/jnumed.106.035337.
14. Bourke V.A., Watchman C.J., Reith J.D. et. al. Spatial gradients of blood vessels and hematopoietic stem and progenitor cells within the marrow cavities of the human skeleton // *Blood*. 2009. Vol. 114, № 19. P. 4077 – 4080. DOI: 10.1182/blood-2008-12-192922.
15. Official website OECD Nuclear Energy Agency (NEA). URL: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_39910/janis (Дата обращения: 27.08.2023).
16. ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP Publication 89 // *Annals of the ICRP*. 2002. Vol. 32 (3-4). P. 5 – 265.
17. Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Волчкова А.Ю. Аналитическое описание дозообразования в костном мозге от ⁹⁰Sr, инкорпорированного в кальцифицированных тканях // *Вопросы радиационной безопасности*. 2021. № 3. С. 72-82.
18. Volchkova A.Yu., Sharagin P.A., Shishkina E.A. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to ⁹⁰Sr incorporated in the adjacent bone segments // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*. 2022. Vol. 15, № 4. P. 44–58 DOI: 10.14529/mmp220404.
19. Campbell B.A., Callahan J., Bressel M. et al. Distribution Atlas of Proliferating Bone Marrow in Non-Small Cell Lung Cancer Patients Measured by FLT-PET/CT Imaging. With Potential Applicability in Radiation Therapy Planning // *International Journal of Radiation Oncology. Biology. Physics*. 2015. Vol. 92, № 5. P. 1035–1043. doi: 10.1016/j.ijrobp.2015.04.027.
20. Lowrance E.W., Latimer H.B. Coefficients of correlation for the weights and linear dimensions of the bones of 105 skeletons from Asia // *American Journal of Anatomy*. 1958. Vol. 102, № 3. P. 455-67. doi: 10.1002/aja.1001020305.
21. Marinković N., Vilić J.V. Correlation between the lengths of the long bones of the forearm and the fibula with body height in our population // *Vojnosanitetski pregled*. 2012. Vol. 69, № 5. P. 394-3988. (Serbian). doi: 10.2298/vsp1205394m.
22. Шарагин П.А., Шишкина Е.А., Толстых Е.И. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга новорожденного ребенка от инкорпорированных бета-излучателей // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2022. №4. С. 74–82. DOI: 10.47183/mes.2022.045
23. Шарагин П.А., Шишкина Е.А., Толстых Е.И. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга годовалого ребенка от инкорпорированных бета излучателей // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2023. №3. С. 45–56. DOI: 10.47183/mes.2023.030.

Поступила: 28.09.2023 г.

Шишкина Елена Анатольевна – доктор биологических наук, исполняющий обязанности заведующего биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России; доцент кафедры радиобиологии Челябинского государственного университета. **Адрес для переписки:** 454014, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: lena@urcrim.ru
ORCID 0000-0003-4464-0889

Шарагин Павел Алексеевич – младший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия
ORCID 0000-0002-1457-4916

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия
ORCID 0000-0002-4958-3214

Для цитирования: Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Толстых Е.И. Влияние изменчивости морфометрических параметров костей человека на неопределенность доз внутреннего облучения костного мозга от ⁹⁰Sr // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 1. С. 60-68. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-60-68

Effect of variability of human bone morphometric parameters on the uncertainty of internal bone marrow doses due to ^{90}Sr

Elena A. Shishkina^{1,2}, Pavel A. Sharagin¹, Evgenia I. Tolstykh¹

¹Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Computational phantoms are used to calculate the doses of internal exposure of active bone marrow. The computational phantoms of ICRP were created for a reference man with anatomical characteristics typical of an average individual. The doses calculated with such phantoms correspond to population-average values. Individual variability introduces a stochastic component of uncertainty into the dose estimation. The objective of this study is to assess the effect of individual variability of bone structure dimensions on the results of dosimetric modeling. The phantoms are represented by simple geometry figures filled with trabecular structures and bone marrow (spongiosa), covered externally with a cortical layer. The models of bone geometry are described by parameters characterizing the linear dimensions, the microarchitecture of the spongiosa (trabecular thickness, trabecular separation, bone volume fraction), as well as the cortical layer thickness. By varying these parameters, sets of phantoms were generated to simulate the individual variability of bone geometry. The mean absorbed dose rate in active bone marrow from a single decay of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ was calculated assuming isotope distribution either in the volume of the trabecular or cortical bone. All estimates are on the example of the phantom of an adult male skeleton. The individual variability of the main parameters of segment computational phantoms depends on size and equal to: a) for linear dimensions – 12-15%; b) for bone volume fraction – 22-24%; c) for cortical thickness – 21-23%. This leads to uncertainties of dose rate estimation equal to 21% – 25%.

Key words: computational phantoms, internal exposure, active marrow, Strontium, uncertainty, individual variability.

Author's personal contribution

Shishkina E.A. – concept development, research design, article writing;

Sharagin P.A. – calculations, article editing;

Tolstykh E.I. – concept development, article editing.

Acknowledgment

The authors are grateful to anonymous reviewers for their time and efforts.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Financial support

Financial support of the study was provided within the framework of the federal target program “Ensuring Nuclear and Radiation safety for 2016-2020 and for the period up to 2030” R&D.

References

1. Krestinina LYu, Davis FG, Schonfeld S, Preston DL, Degteva M, Epifanova S, et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007. *British Journal of Cancer*. 2013;109: 2886-2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614. PubMed PMID: 24129230; PubMed Central PMCID: PMC3844904.
2. Pelevina II, Akleyev AV, Kogarko IN, Petushkova VV, Kogarko BS, Pryakhin EA, et al. Radiation-chemical effect of ionizing radiation on the body and genotoxic disorders of the blood system. *Khimicheskaya fizika = Chemical Physics*. 2021;40(12): 48-55. DOI: 10.31857/S0207401X2112013X (In Russian)
3. Akleyev AV. Early signs of chronic radiation syndrome in residents of the Techa riverside settlements. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2021;60(2): 203-212. DOI: 10.1007/s00411-021-00897-8. PubMed PMID: 33677652.
4. Akleyev AV, Akleyev AA, Degteva MO, Andreev SS, Blinova EA, Bugrov NG, et al. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health. Chelyabinsk: Kniga. 2016; 390 p. (in Russian)
5. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External radiation Exposures. ICRP Publication 116. *Annals of the ICRP*. 2010; 40(2-5): 1-257. DOI: 10.1016/j.icrp.2011.10.001. Erratum in: *Annals of the ICRP*. 2015; 44(1):128-34.
6. Zalyapin VI, Timofeev YuS, Shishkina EA. A parametric stochastic model of bone geometry. *Bulletin of Southern Urals State University. Issue «Mathematical Modelling. Programming & Computer Software» (SUSU MMCS)*. 2018;11(2): 44-57. DOI: 10.14529/mmp180204.
7. Shishkina EA, Zalyapin VI, Timofeev YuS, Degteva MO, Smith M, Napier B. Parametric stochastic model of bone structures to be used in computational dosimetric phantoms of human skeleton. *Radiation and Applications*. 2018;3(2): 133-137. DOI: 10.21175/RadJ.2018.02.022.
8. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Sharagin PA, Smith MA, et al. Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton

Elena A. Shishkina

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: lena@urcrm.ru

- for beta-emitting radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 66-75. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75> (In Russian).
9. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AYU, et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description // PLoS ONE. 2021; 16(10): e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605.
 10. Shishkina EA, Sharagin PA, Tolstykh EA. The uncertainty of estimation of doses to the bone marrow from ^{89,90}Sr due to the variability of the chemical composition and bone density. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 32-43. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-2-32-43> (In Russian).
 11. Shishkina EA, Timofeev YS, Volchkova AYU, Sharagin PA, Zalyapin VI, Degteva MO, et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry. *Health Physics*. 2020;118(1): 53-9. DOI: 10.1097/hp.0000000000001127.
 12. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Volchkova AYU, Degteva MO. Anatomical and morphological basis for dosimetric modeling of human trabecular bone using stochastic parametric approach. *Klinicheskiy vestnik FMBTs im. A.I. Burnazyana = Clinical Bulletin of the A.I. Burnazyan FMBC*. 2022;3: 25-40. DOI: 10.33266/2782-6430-2022-3-25-40 (In Russian).
 13. Watchman CJ, Bourke VA, Lyon JR, Knowlton AE, Butler SL, Grier DD, et al. Spatial distribution of blood vessels and CD34+ hematopoietic stem and progenitor cells within the marrow cavities of human cancellous bone. *Journal of Nuclear Medicine*. 2007;48(4): 645-654. DOI: 10.2967/jnumed.106.035337.
 14. Bourke VA, Watchman CJ, Reith JD, Jorgensen ML, Dieudonné A, Bolch WE. Spatial gradients of blood vessels and hematopoietic stem and progenitor cells within the marrow cavities of the human skeleton. *Blood*. 2009;114(19): 4077 – 4080. DOI: 10.1182/blood-2008-12-192922.
 15. Official website OECD Nuclear Energy Agency (NEA). Available from: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis (Accessed 27.08.2023).
 16. ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP Publication 89. *Annals of the ICRP*. 2002;32(3-4): 5 – 265.
 17. Shishkina EA, Sharagin PA, Volchkova AYU. Analytical description of dose forming in bone marrow from ⁹⁰Sr incorporated in calcified tissues. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of Radiation Safety*. 2021;3: 72-82 (In Russian).
 18. Volchkova AYU, Sharagin PA, Shishkina EA. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to ⁹⁰Sr incorporated in the adjacent bone segments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*. 2022;15(4): 44–58 DOI: 10.14529/mmp220404.
 19. Campbell BA, Callahan J, Bressel M, Simoens N, Everitt S, Hofman MS, et al. Distribution Atlas of Proliferating Bone Marrow in Non-Small Cell Lung Cancer Patients Measured by FLT-PET/CT Imaging. With Potential Applicability in Radiation Therapy Planning. *International Journal of Radiation Oncology. Biology. Physics*. 2015;92(5): 1035–1043. doi: 10.1016/j.ijrobp.2015.04.027.
 20. Lowrance EW, Latimer HB. Coefficients of correlation for the weights and linear dimensions of the bones of 105 skeletons from Asia. *American Journal of Anatomy*. 1958;102(3): 455-67. doi: 10.1002/aja.1001020305.
 21. Marinković N, Vilić JV. Correlation between the lengths of the long bones of the forearm and the fibula with body height in our population. *Vojnosanitetski pregled*. 2012;69(5): 394-3988. (Serbian). doi: 10.2298/vsp1205394m.
 22. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI. Computational phantom for red bone marrow dosimetry from incorporated beta emitters in a newborn baby. *Meditsina ekstremnykh situatsiy = Extreme Medicine*. 2022;(4): 70-77. DOI:10.47183/mes.2022.045. (In Russian).
 23. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI. Computational red bone marrow dosimetry phantom of a one-year-old child enabling assessment of exposure due to incorporated beta emitters. *Meditsina ekstremnykh situatsiy = Extreme Medicine*. 2023; (3): 45–56. DOI: 10.47183/mes.2023.030. (In Russian).

Received: September 28, 2023

For correspondence: Elena A. Shishkina – Doctor of Biology, acting Head of the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine Federal Medical Biological Agency of Russia; Associate Professor of the Department of Radiobiology of Chelyabinsk State University (Vorovsky str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: lena@urcrm.ru)

ORCID 0000-0003-4464-0889

Pavel A. Sharagin – junior researcher the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine Federal Medical Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

ORCID 0000-0002-1457-4916

Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biology, Leading researcher of the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine Federal Medical Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

ORCID 0000-0002-4958-3214

For citation: Shishkina E.A., Sharagin P.A., Tolstykh E.I. Effect of variability of human bone morphometric parameters on the uncertainty of internal bone marrow doses due to ⁹⁰Sr. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 60-68. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-60-68

Оценка микросфер альбумина для радиоаэрозольного исследования отложения ингалированных веществ и мукоцилиарного клиренса

В.И. Кобылянский ¹, О.Б. Чечеткина ²

¹ Научно-исследовательский институт пульмонологии Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

² Федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Изучение и оценка ведущих защитных механизмов органов дыхания, какими являются аэродинамическая фильтрация и отложение ингалированных веществ, а также мукоцилиарный клиренс остаются одной из ключевых, но нерешенных проблем современной медицины, касающихся как радиационной гигиены и токсикологии, так и пульмонологии. Модель респираторного тракта, представленная Международной комиссией по радиационной защите, лишь частично касается их, значительно ограничивая целесообразность и возможность ее использования. Исследование и прямая оценка этих механизмов, несомненно, способствуют совершенствованию методов профилактики и лечения от воздействия инкорпоративных радионуклидов, поступающих ингаляционным путем, а также способов диагностики и лечения заболеваний органов дыхания, направленных на самые ранние этапы их патогенеза, учитывая, что от процессов отложения ингалированных веществ и клиренса легких, прежде всего мукоцилиарного, напрямую зависят как лечебное, так и патогенное воздействие. Особо актуальным это является при наличии опасности загрязнения радиоактивными отходами, когда возникает острая необходимость бороться с высокопатогенным влиянием и его последствиями. Наиболее информативным методом для исследования процессов отложения ингалянта и мукоцилиарного клиренса является радиоаэрозольный, предусматривающий ингаляцию радиофармпрепаратов и регистрацию их отложения и выведения с помощью радиодиагностической аппаратуры. Однако в силу сложившихся обстоятельств радиофармпрепараты, которые можно было бы использовать для подобного исследования, начиная с 2000-х гг., отсутствуют, что и побудило нас к осуществлению настоящей работы. При этом потенциально подходящим, но не изученным, радиофармпрепаратом в этом плане рассматривается отечественный — микросферы альбумина, меченные ^{99m}Tc. Целью работы явилось изучение аэродинамических свойств микросфер альбумина и оценка возможностей их использования для радиоаэрозольного исследования процессов отложения ингалированных веществ и мукоцилиарного клиренса. Аэродинамические свойства микросфер альбумина изучались с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопией путем изучения их сухой дисперсии исходной и полученной из взвеси ее в дистиллированной воде, генерируемой ультразвуковым ингалятором. Результаты свидетельствовали, что диспергируемые частицы характеризовались сферичностью, четкой дифференциацией по границам и относительно гомогенным характером распределения частиц с относительно узким диапазоном по размеру (разброс 1–2,5 мкм) и незначительной конгломерацией, а также гладкой поверхностью. Исследуемые микросферы альбумина являются подходящими для радиоаэрозольного исследования процессов отложения ингалированных веществ и мукоцилиарного клиренса.

Ключевые слова: радиофармпрепарат, микросферы альбумина, дисперсность аэрозоля, форма и морфология частиц, процессы отложения и мукоцилиарный клиренс.

Введение

Эпидемиологические исследования в области радиационной гигиены указывают на возможные вредоносные последствия (например, на риск рака легких) в результате ингаляционного поступления радионуклидов с аэрозо-

лями в организм человека, например, при добыче полезных ископаемых. Это влияние во многом определяется особенностями процессов отложения и мукоцилиарного клиренса (МЦК), характеризующих накопление радиоактивных аэрозолей и экспозицию радиационного воздей-

Кобылянский Вячеслав Иванович

Научно-исследовательский институт пульмонологии

Адрес для переписки: 115628, Россия, Москва, Ореховый б-р, д.28; E-mail: kobylyansky@mail.ru

ствия, которые напрямую связаны с дозой [1, 2]. Чтобы понять и прогнозировать реакции на вдыхание радиоактивных аэрозолей, являющихся одним из основных путей воздействия, необходимо адекватно оценивать эти процессы, данные о которых немногочисленны и получены исключительно зарубежными исследователями, которыми также разработана общепринятая модель респираторного тракта [3, 4]. Понятно, что подобные данные важны не только с позиций радиационной гигиены и санитарного надзора за радиационной безопасностью лиц, считающихся здоровыми, и определения профессиональной годности для работы с радиоактивными веществами, но и в случае контакта с другими профессиональными патогенными аэрозолями, например, в лакокрасочной промышленности и пр. Они также являются не менее важными и при заболеваниях бронхолегочной системы с целью оценки возможных нарушений этих процессов, отражающих важнейшие функции ведущих защитных механизмов органов дыхания и способных существенно модулировать радиационные воздействия в негативную сторону [5, 6]. Поэтому их адекватная оценка важна как в совершенствовании профилактики и лечения последствий лучевой нагрузки в результате ингаляций радиоактивных веществ, определении взаимно модулирующего с ней влияния бронхолегочных заболеваний при этом, так и в разработке методов ранней диагностики и лечения этих заболеваний. Наряду с этим, решение данной проблемы позволяет:

- существенно углублять и совершенствовать наши представления и знания о патогенетических особенностях болезней органов дыхания и патологических состояниях, связанных с вредоносными для организма факторами окружающей среды;

- диагностировать на ранних стадиях бронхолегочные заболевания, что является важнейшим, трудным и мало решенным вопросом и осуществляемым, к сожалению, часто поздно, когда помощь больному, как правило, малоэффективна;

- своевременно дифференцировать моногенную и мультифакториальную патологию легких, когда эффективность лечения наиболее высока и потенциально имеются шансы добиться реального существенного успеха в их лечении;

- верифицировать корреляцию между генетическими дефектами и функцией систем органов дыхания на клеточном уровне и осуществлять редактирование генома и поворота патологического процесса вспять;

- осуществлять объективный прямой контроль за: а) действием препаратов разных многочисленных групп, присутствующих на рынке, включая огромное количество дорогостоящих отхаркивающих средств, бронхолитиков, различных групп противовоспалительных препаратов (гормонов, моноклональных антител, антибиотиков, иммунокорректоров и многих других), б) результатами физиотерапевтической, хирургической и генетической коррекции нарушений в бронхолегочной системе;

- реализовывать направленную доставку ингалируемых аэрозолей, существенно повышающую возможности разных диагностических и лечебных технологий;

- расширять спектр, повышать точность прогнозирования эффективности диагностики и планируемого лечения и оптимизировать их стратегию и многое другое.

И если за рубежом имеются многочисленные работы, направленные на изучение отложения ингалированных веществ и МЦК, которым посвящены целые разделы и рубрики, например, в таком авторитетном библиографическом издании, каким является *Index Medicus*, то в отечественной науке они единичные. При этом на сегодняшний день отсутствуют какие-либо стандартные технологии, методики, позволяющие адекватно оценивать эти процессы. Существующая модель респираторного тракта требует совершенствования с учетом влияния разных факторов на эти процессы, включая, например, физическую нагрузку, разные патологические состояния и заболевания и др., которые не изучены за рубежом, а у нас в стране практически не исследуются. Это требует использования соответствующего адекватного метода. Наиболее информативный метод изучения процессов отложения и МЦК как таковых – радиоаэрозольный в силу того, что он является единственным прямым, производимым в условиях *in vivo*, физиологичным, неинвазивным и позволяет оценивать клиренс легких на всех уровнях респираторного тракта [7]. До 2000-х гг. подобный метод был разработан и успешно использован в России [8, 9]. Однако в последующем официально зарегистрированный радиофармпрепарат (РФП), который использовался для этих целей, перестал предлагаться на мировом рынке. В результате этого и известных экономических условий в стране радиоаэрозольный метод для исследования отложения ингалированных веществ и МЦК перестал применяться, что стало огромной проблемой, устранение которой и легло в основу настоящей работы.

Для разработки радиоаэрозольного метода прежде всего требуется наличие соответствующего РФП. Разными исследователями использовались разные индикаторы-метки, по которым можно следить за этими процессами. Однако единственными из них официально зарегистрированными в качестве РФП, предназначенного для этих целей, оказались микросферы альбумина от компании CEA SORIN (Франция) в виде набора «ТСК-5». Они были исследованы нами на предмет аэродинамических свойств с использованием электронной микроскопии и лазерной спектрометрии, а также путем прямого определения распределения аэрозоля в легких радионуклидным методом [7]. Было установлено, что они являются подходящим РФП для исследования процессов отложения и МЦК. Но в силу отсутствия данного РФП и необходимости воссоздания радиоаэрозольного метода в современных реалиях наше внимание привлек сходный по физико-химическим свойствам, включая стабильность соединения, РФП – макроагрегаты альбумина (МАО), выпускаемый в России под торговой маркой «Макротех». Однако проведенное нами в связи с этим исследование его аэродинамических свойств показало, что данный РФП не является оптимальным в этом плане, хотя, возможно, для окончательного вывода о возможности его использования требуется прямая оценка отложения ингалированного радиоаэрозоля, генерируемого из него [10]. Наряду с этим, отечественными учеными были разработаны микросферы альбумина (МСА) [11, 12], потенциал которых указывает на их более значительную оптимальность с позиции аэродинамики для данного целевого использования и требует исследования и оценки этого потенциала, что, возможно, обеспечит разработку конкурентоспособной технологии.

Цель исследования – изучить аэродинамические свойства аэрозоля МСА и оценить возможности их использования для радиоаэрозольного исследования процессов отложения ингалированных веществ и МЦК.

Материалы и методы

Оценка отложения и МЦК значительно зависит от аэродинамических свойств ингалируемого диагностического аэрозоля, генерируемого из МСА, как и эффективность при его использовании в качестве лечебного воздействия [13]. Аэродинамические свойства МСА, включая форму и морфологию частиц, а также распределение их по фракциям с определением их среднего размера, исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии путем изучения 5 мг их сухой дисперсии исходной и полученной из взвеси ее в дистиллированной воде, генерированной ультразвуковым ингалятором. Результирующую взвесь в виде конденсата аэрозоля собирали с помощью предметных стекол и высушивали, а затем отделяли частицы в сухом виде и исследовали. Накануне производилась предварительная оценка с применением оптического микроскопа. Для сканирующей электронной микроскопии образцы материала наклеивали на медные пластины на двухсторонний электропроводный скотч и напыляли на образцы платину в атмосфере аргона (10–20 Па) в камере катодного напыления установки Val-Tec SCD 005 (Бальцерс, Лихтенштейн) в течение 130 с. Далее образцы изучали на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430 VP в условиях высокого вакуума с использованием детектора обратно отражённых электронов 4Q BSD (Карл Цейс, Германия) при комнатной температуре, ускоряющем напряжении 19 кВт и рабочем расстоянии 14 мм.

Результаты исследования

Сравнительная оценка результатов исследования частиц макроагрегатов альбумина, полученных с помощью разных методов в нашей предыдущей работе, свидетельствовала о некотором несоответствии данных, полученных с помощью лазерного дифракционного анализатора и сканирующей электронной микроскопии [10]. Так, последняя четко указывала на наличие агрегатов размером до 10 мкм и выше и отдельных частиц размером около 3–5 мкм, что не дифференцировалось при использовании лазерного дифракционного анализатора, путем применения которого размер исследуемых частиц в среднем определялся около 4,54 мкм. Кроме того, при сканирующей электронной микроскопии, помимо формы и характера поверхности частиц, которые играют значительную роль для их аэродинамического диаметра, можно было определять количество частиц и плотность их распределения в объеме. То есть в этом случае имела место более оптимальная оценка аэродинамических свойств исследуемой дисперсии, столь важная для реализации радиоаэрозольного способа диагностики исследуемых легочных функций и его точности, позволяющая ограничиться использованием сканирующей электронной микроскопии, хотя, возможно, целесообразно использование 2 методов оценки дисперсности. Но в настоящей работе, учитывая вышеизложенное, мы ограничились использованием сканирующей электронной микроскопии.

Как и при оптической микроскопии (рис., б), форма частиц МСА, определённая после диспергирования их взвеси

с помощью сканирующей электронной микроскопии, характеризовалась сферичностью и относительно гомогенным характером распределения в относительно узком диапазоне по размерам, составляющем, как и в исходном состоянии испытуемого образца, главным образом 7,14–9,38 мкм (средний около 8 мкм) (рис., г). Конгломерация частиц МСА была относительно небольшой, как это характерно, например, для частиц макроагрегатов альбумина (рис., в, д) [10], при этом частицы МСА четко дифференцировались по границам и были относительно равномерно распределены в поле зрения, что позволяло оценить их морфологию, включая форму, структурную организацию, и оценить фракционное распределение по размерам. И это имело место, наряду с тем, что в исходном состоянии МСА разделить по границам частиц часто было невозможно и в поле зрения они сливались в виде крупных пятен, создавая видимость как бы одной крупной частицы (рис., а), что создает затруднения для статистической обработки данных с позиции оценки фракционного распределения частиц. То есть воздействие жидкости, в которую помещали исходную дисперсию МСА, а также ультразвуковое диспергирование способствовали разделению и относительно равномерному распределению частиц в аэродисперсной системе, что является весьма благоприятной аэродинамической характеристикой. Поверхность частиц на значительном протяжении была относительно гладкой с наличием относительно редких небольших выпуклообразных образований (рис., е).

Все это существенно отличало МСА от макроагрегатов альбумина, исследованных нами в предыдущей работе, для которых как в исходном, так и в результирующем состоянии были присущи: значительная гетерогенность относительно размеров дисперсии (исходный разброс 10–100 мкм), сложная форма и наличие крупных агрегатов, напоминающих губчатые или коралловые структуры с морщинистой поверхностью, значительно увеличивающих эквивалентный диаметр частиц сферической формы (рис., ж, з) [7, 10, 13].

Обсуждение

Результаты изучения аэродинамических свойств МСА и оценки возможностей их использования для радиоаэрозольного исследования функции отложения ингалированных веществ и МЦК указывают на то, что все физические параметры, касающиеся этих свойств, позволяют благоприятно характеризовать этот РФП с позиции планируемого целевого применения. К ним можно отнести сферичность частиц, относительно небольшой их диапазон по размеру, гладкость поверхности и др. При этом сферичность и гладкость частиц способствуют стабильной характеристике их аэродинамического диаметра [7, 13]. Их относительно небольшие размеры и возможность их контроля оптимизируют место их отложения и обеспечивают достижение в заданном регионе. Сравнительно небольшой диапазон среднего размера частиц меньше отличаться от их аэродинамического диаметра при вдыхании. Все эти свойства предрасполагают к совпадению счетной и массовой концентраций и к более локальному и воспроизводимому отложению в легких, а следовательно, повышают возможности его стандартизации. Как уже упоминалось, важной характеристикой аэродинамических свойств ингалируемого аэрозоля является размер

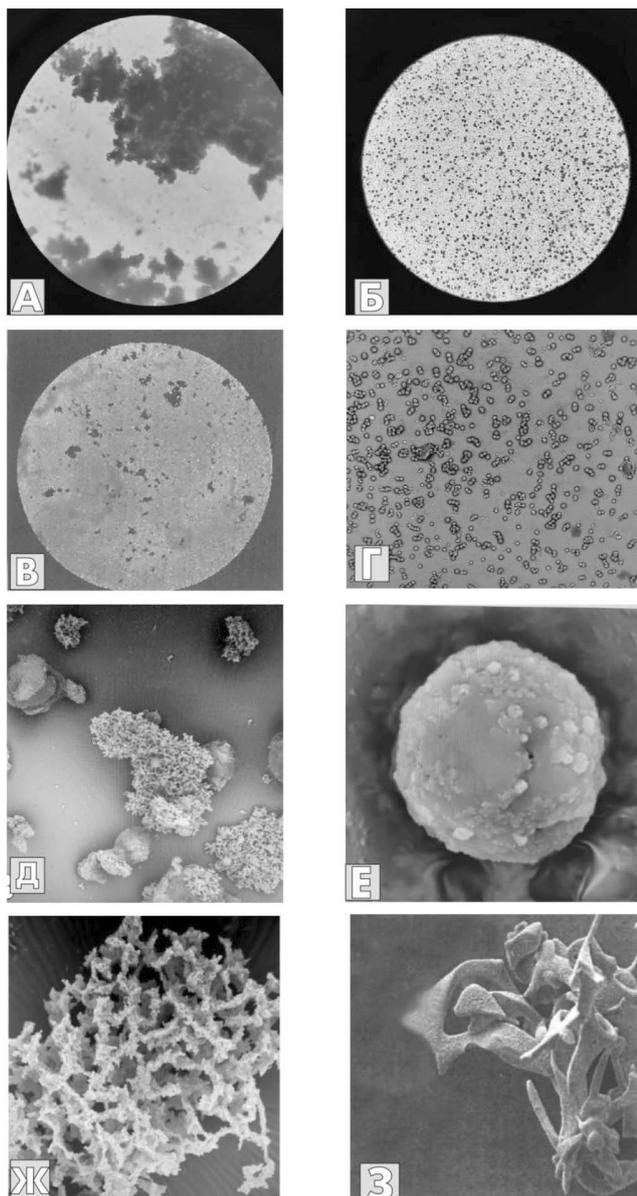


Рис. Оптическая микроскопия (I) и сканирующая электронная микроскопия (II) дисперсии микросфер альбумина (МСА) и макроагрегатов альбумина (МАО): I: А – исходное состояние МСА; Б – МСА из взвеси; В – МАО из взвеси с агломератами. II: Г – дисперсия МСА; Д – агломераты частиц МАО; Е – частица МСА; Ж – частица МАО; З – частица МАО

[Fig. Optical microscopy (I) and scanning electron microscopy (II) of the dispersion of albumin microspheres (MSA) and albumin macroaggregates (MAA): I: A – the initial state of the ISA; Б – MSA from suspension; В – MAA from suspension with agglomerates. II: Г – dispersion of MSA; Д – agglomerates of MAA particles; Е – MSA particle; Ж – MAA particle; З – the MAA particle]

его частиц. Размер частиц в испытуемом образце, согласно паспортным данным к РФП, составляет 8–10 мкм. Для исследования согласно поставленным целям, очевидно, желательнее применение частиц с более высокой дисперсностью, менее 8 мкм. Это вполне можно реализовать путем использования соответствующих (например, стекляннно-волоконных) фильтров, обеспечивающих выделение фракции с подобным размером частиц. Контроль размера частиц и возможности влияния на него обеспечивают этому РФП использование не только с целью исследования процессов отложения ингаляционных веществ и МЦК, но и для оценки перфузионно-вентиляционного соотношения, а также гидродинамики в кровеносной системе легких с целью диагностики их нарушений. В частности, это может касаться тромбоэмболии легочной артерии, разных форм легочной гипертензии, при которых скintiграфия легких имеет ключевое значение [14]. Необходимо подчеркнуть, что разработка отечественных РФП особенно важна в условиях современного рынка, когда секционные воздействия существенно ограничивают возможности использования зарубежных РФП или материалов, позволяющих их получать. Это существенно удешевляет технологию исследования и делает ее конкурентоспособной и в большей мере в случае обладания технологическими преимуществами.

Говоря о целесообразности использования РФП в виде МСА для исследования процессов отложения и МЦК, его аэродинамических свойствах, во многом определяющих эту целесообразность, нельзя не коснуться уровня предполагаемой возможной лучевой нагрузки, которая также вносит значительный вклад в определение целесообразности подобного использования. Во-первых, она соответствует допустимым уровням, что подтверждено многолетними исследованиями в области радионуклидной диагностики, в том числе и с аналогичными по своей сути препаратами, в частности, как мы упоминали в работе, МАО (Макротехом). Во-вторых, надо принимать в расчет, что, согласно литературным данным, лучевая нагрузка при перфузионной скintiграфии легких даже выше¹. При этом нужно иметь в виду, что исходная активность, вводимая во флакон для приготовления РФП из МСА для ингаляционной динамической скintiграфии, должна быть выше. Обусловлено это тем, что в дыхательные пути попадает всего 1/10 от исходной диспергируемой взвеси [15], а также фактом влияния эффективной элиминации ингалянта из проводящих дыхательных путей за счет МЦК, что, естественно, уменьшает лучевую нагрузку. Поэтому лучевая нагрузка может быть меньше той, которая имеет место при перфузионной скintiграфии.

Заключение

Таким образом, изучены аэродинамические свойства отечественного РФП, МСА, и установлено, что они

¹ Методические указания. 2.6.1. 3700-21. 31.08.2021. Гигиена. Радиационная гигиена. Ионизирующее излучение. Радиационная безопасность. Оценка и учёт эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований [Methodical instructions. 2.6.1. 3700-21. 08/31/2021 Hygiene. Radiation hygiene. Ionizing study. Radiation safety. Evaluation and accounting of effective doses in patients during radionuclide diagnostic studies. (In Russ.)]

являются оптимальными для исследования процессов отложения и МЦК. Данная констатация указывает на новые перспективы и возможности в оценке этих и других клинически значимых процессов с помощью отечественного инновационного импортозамещающего РФП. Для окончательного суждения о возможностях использования МСА для радиоаэрозольного исследования отложения ингаляционных веществ и МЦК целесообразна прямая оценка их отложения в легких, что требует осуществления определенных стандартных этапов исследования данного РФП для его внедрения в клиническую практику и привлечения учреждений, причастных к созданию МСА.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кобылянский В.И. осуществлял общее руководство работой, исследование, анализ полученных данных и литературы. Написал черновик рукописи и представил окончательный вариант в редакцию журнала.

Чечеткина О.Б. выполняла анализ литературы и полученных данных, а также редакцию промежуточного варианта статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

- Comparative Dosimetry of Radon in Mines and Homes. Panel on Dosimetric Assumptions Affecting the Application of Radon Risk Estimates. Board on Radiation Effects Research. National Research Council. National Press. Washington: D.C.; 1991.
- Oberdörster G. Lung particle overload: implications for occupational exposures to particles // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 1995. Vol. 21, No 1. P. 123-35. doi: 10.1006/rtp.1995.1017.
- Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a Task Group of the International Commission on Radiological Protection. Publication 66 // *Annals of the ICRP*. 1994. Vol. 24, No (1-3). P. 1-482. ID: 7726471.
- Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С. и др. Под общей ред. д.м.н. В.С. Калистратовой. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. М.: ФМБУ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2012. 464 с.
- Bailey K.L. Aging Diminishes Mucociliary Clearance of the Lung // *Advances in Geriatric Medicine and Research*. 2022. Vol. 4, No 2. P. e220005. doi: 10.20900/agmr20220005.
- Möller W., Häussinger K., Ziegler-Heitbrock L., Heyder J. Mucociliary and long-term particle clearance in airways of patients with immotile cilia // *Respiratory Research*. 2006. Vol. 7, No 1. P. 10. doi: 10.1186/1465-9921-7-10.
- Кобылянский В.И. Мукоцилиарная система. Фундаментальные и прикладные аспекты. М.: Бином, 2008. 416 с.
- Кобылянский В.И., Артюшкин А.В. А.с. СССР SU 1 387 982 А1. Способ определения экскреторной функции лёгких. 1988.
- Кобылянский В.И. А.с. SU 1602469 А1 СССР. Способ определения функции мукоцилиарного аппарата легких. 1990.
- Кобылянский В.И., Кудашева Т.В., Березина М.Г. и др. Методы и средства измерений аэродинамических параметров частиц аэродисперсной системы для оценки возможностей динамической аэрозольной скинтиграфии лёгких // *Измерительная техника*. 2023. № 5. С. 61-67. doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-5-61-67.
- Петриев В.М., Скворцов В.Г., Смахин Л.А., Рыжикова Т.П. Нейтронно-активационный способ получения микросфер альбумина – потенциального радиофармпрепарата для лечения онкологических заболеваний // *Радиохимия*. 2005. № 3. С. 274-277.
- Каприн А.Д., Иванов С.А., Петриев В.М. и др. Способ получения меченных радионуклидом микросфер. Патент № 2724880. 2020. Бюлл. №18.
- Scheuch G., Bennett W., Borgström L., et al. Deposition, imaging, and clearance: what remains to be done? // *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*. 2010. Vol. 23, Suppl. 2. P. 39-57. doi: 10.1089/jamp.2010.0839.
- Медведев А.П., Федоров С.А., Трофимов Н.А., Целоусова Л.М. Ошибки диагностики и лечения тромбозов легочной артерии // *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2021. Т. 14. № 1. С. 54-59. DOI: 10.17116/kardio20211401154.
- Ball D.R., McGuire B.E. Airway pharmacology. In Hagberg C.A., editor, Benumof and Hagberg's airway management. 3rd ed. Philadelphia, PA.: Elsevier. 2013. P. 159-183. e9 doi: 10.1016/B978-1-4377-2764-7.00006-3.

Поступила: 13.07.2023 г.

Кобылянский Вячеслав Иванович – доктор медицинских наук, профессор образовательного центра Научно-исследовательского института пульмонологии Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 115628, Россия, Москва, Ореховый бульвар, д. 28; E-mail: kobylyansky@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1523-9669

Чечеткина Ольга Борисовна – заведующая радиоизотопным отделением Федерального научно-клинического центра Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Для цитирования: Кобылянский В.И., Чечеткина О.Б. Оценка микросфер альбумина для радиоаэрозольного исследования отложения ингаляционных веществ и мукоцилиарного клиренса // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 1. С. 69-75. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-69-75

Evaluation of the possibilities of using albumin microspheres for radioaerosol study of the deposition of inhaled substances and mucociliary clearance

Vyacheslav I. Kobylansky¹, Olga B. Chechetkina²

¹ Educational Center of the Research Institute of Pulmonology of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

² Federal Scientific and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russia

The need to study and evaluate the leading protective mechanisms of the respiratory system remains one of the key, but unresolved problems of modern medicine, concerning both radiation hygiene and toxicology, and pulmonology. The model of the respiratory tract presented by the ICRP only partially addresses them, significantly limiting the feasibility and possibilities of its use. The solution of this problem undoubtedly contributes to the improvement of methods of prevention and treatment from the effects of incorporative radionuclides entering by inhalation, as well as methods for diagnosing and treating respiratory diseases aimed at the earliest stages of their pathogenesis, given that the processes of deposition of inhaled substances and lung clearance directly depend both therapeutic and pathogenic effects. This is especially relevant when there is a danger of contamination with radioactive waste, when there is an urgent need to deal with highly pathogenic influence and its consequences. The most informative method for studying the processes of deposition of inhaled substances and mucociliary clearance is radioaerosol. However, due to the circumstances, there are no radiopharmaceuticals that could be used for such a study since the 2000s, which prompted us to carry out this work. At the same time, albumin microspheres labeled with ^{99m}Tc are considered potentially suitable, but not studied radiopharmaceuticals in this regard. The aim of the work was to study the aerodynamic properties of albumin microspheres and evaluate the possibilities of their use for radioaerosol study of the processes of deposition of inhaled substances and mucociliary clearance. The aerodynamic properties of albumin microspheres were studied using optical and scanning electron microscopy by studying their dry dispersion, initial and obtained from its suspension in distilled water, generated by an ultrasonic inhaler according to the developed technology. The results indicated that the dispersible particles were characterized by sphericity, clear boundary differentiation and a relatively homogeneous distribution of particles with a relatively narrow size range (spread 1–2.5 μm) and little conglomeration, as well as a smooth surface. Conclusion. The investigated albumin microspheres are suitable for radioaerosol study of the processes of deposition of inhaled substances and mucociliary clearance.

Key words: radiopharmaceutical, albumin microspheres, aerosol dispersion, shape and morphology of particles, deposition processes and mucociliary clearance.

Personal contribution of the authors

Kobylansky V.I. provided general supervision of the work, research, and analysis of the data and literature obtained. Wrote a draft of the manuscript and submitted the final version to the editors of the journal.

Chechetkina O.B. performed an analysis of the literature and the data obtained, as well as editing an intermediate version of the article.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding

The study was not sponsored.

References

1. Comparative Dosimetry of Radon in Mines and Homes. Panel on Dosimetric Assumptions Affecting the Application of Radon Risk Estimates. Board on Radiation Effects Research. National Research Council. National Press. Washington, D.C. 1991.
2. Oberdörster G. Lung particle overload: implications for occupational exposures to particles. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 1995;21(1): 123-35. doi: 10.1006/rtp.1995.1017.
3. Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a Task Group of the International Commission on Radiological Protection. Publication 66. *Annals of the ICRP*. 1994;24(1-3): 1-482. ID: 7726471.
4. Kalistratova VS, Belyaev IK, Igor K, Zhorova ES. Under the general editorship. MD V.S. Kolistratova. Radiobiology of incorporated radionuclides. Moscow: Federal biomedical agency of Burnazyan; 2012. 464 p. (In Russian).
5. Bailey KL. Aging Diminishes Mucociliary Clearance of the Lung. *Advances in Geriatric Medicine and Research*. 2022;4(2): e220005. doi: 10.20900/agmr20220005.
6. Möller W, Häussinger K, Ziegler-Heitbrock L, Heyder J. Mucociliary and long-term particle clearance in airways of patients with immotile cilia. *Respiratory Research*. 2006;7(1): 10. doi: 10.1186/1465-9921-7-10.

Vyacheslav I. Kobylansky

Educational Center of the Research Institute of Pulmonology

Address for correspondence: Orekhovy blvd., 28, Moscow, Russia, 115682; E-mail: kobylansky@mail.ru

7. Kobylansky VI. Mucociliary system. Fundamental and applied aspects. Moscow: Binom; 2008. 416 p. (In Russian).
8. Kobylansky VI, Artyushkin AV. SU 1 387 982 A1. A method for determining the excretory function of the lungs. 1988 (In Russian).
9. Kobylansky VI. SU 1602469 A1. A method for determining the function of the mucociliary apparatus of the lungs. 1990. (In Russian).
10. Kobylansky VI, Kudasheva TV, Berezina MG, Magomedov TM, Belenkiy DI. Methods and means for measuring the aerodynamic parameters of particles of an aerodisperse system to assess the possibilities of dynamic aerosol scintigraphy of the lungs. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2023;5: 61-67. (In Russian) doi: [org/10.32446/0368-1025it.2023-5](https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-5).
11. Petriev VM, Skvortsov VG, Smakhtin LA, Ryzhikova TP. Neutron-activation method for obtaining albumin microspheres – a potential radiopharmaceutical for the treatment of oncological diseases. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 2005;3: 274-277. (In Russian).
12. Kaprin AD, Ivanov SA, Petriev VM, Vlasova OP, Ryzhikova TP, Nerozin NA, et al. Method for obtaining radionuclide-labeled microspheres. Patent № 2724880-2020 Bull. No. 18. (In Russian).
13. Scheuch G, Bennett W, Borgström L, Clark A, Dalby R, Dolovich M, et al. Deposition, imaging, and clearance: what remains to be done? *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*. 2010;23(2): 39–57. <https://doi.org/10.1089/jamp.2010.0839>.
14. Medvedev AP, Fedorov SA, Trofimov NA, Tselousova LM. Mistakes in the diagnosis and treatment of pulmonary embolism. *Kardiologiya i serdechno-sosudistaya khirurgiya = Cardiology and cardiovascular surgery*. 2021;14(1): 54-59. (In Russian). DOI: [10.17116/kardio20211401154](https://doi.org/10.17116/kardio20211401154).
15. Ball DR, McGuire BE. Airway pharmacology. In Hagberg CA, editor, Benumof and Hagberg's airway management. 3rd ed. Philadelphia, PA: Elsevier; 2013. P. 159-183. e9 doi: [10.1016/B978-1-4377-2764-7.00006-3](https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-2764-7.00006-3).

Received: July 13, 2023

For correspondence: Vyacheslav I. Kobylansky – Doctor of Medical Sciences, Professor of the Educational Center of the Research Institute of Pulmonology of the Federal Medical and Biological Agency of Russia (Orehovoy blvd., 28, Moscow, Russia, 115682; E-mail: kobylansky@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-1523-9669

Olga B. Chechetkina – Head of the Radioisotope Department of the Federal Scientific and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

For citation: Kobylansky V.I., Chechetkina O.B. Evaluation of the possibilities of using albumin microspheres for radioaerosol study of the deposition of inhaled substances and mucociliary clearance. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 69-75. (In Russian). DOI: [10.21514/1998-426X-2024-17-1-69-75](https://doi.org/10.21514/1998-426X-2024-17-1-69-75)

Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте населения, облученного в возрасте до 20 лет

С.С. Силкин, Л.Ю. Крестинина

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

*Целью данного исследования являлась прямая оценка избыточного относительного риска смерти от солидных злокачественных новообразований у лиц, подвергшихся хроническому облучению в возрасте моложе 20 лет преимущественно в диапазоне малых и средних доз (до 1 Гр) и низкой мощности дозы. В исследуемую когорту включено население, подвергшееся облучению в возрасте моложе 20 лет на Южном Урале в результате двух крупных радиационных аварий на производственном объединении «Маяк». Численность когорты составила 32 762 человека, период наблюдения – 71 год (с 1950 по 2020 г.), число человеко-лет под риском – 1 218 855. Челябинская и Курганская области включены в территорию наблюдения за смертностью в когорте. За 71-летний период наблюдения в когорте зарегистрировано 1788 случаев смерти от солидных злокачественных новообразований. Средняя доза, накопленная в стенках желудка за весь период наблюдения, составила 0,04 Гр, максимальная – 1,1 Гр. Анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований проводился с использованием программ *Amfit* и *Datab* (статистический пакет *Epicure*) методом Пуассоновской регрессии при помощи простой параметрической модели избыточного относительного риска. Оценка статистической значимости результата проводилась методом максимального правдоподобия с 95% вероятностью. Впервые получены прямые оценки избыточного относительного риска смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте населения, облученного в возрасте до 20 лет за 71-летний период (избыточный относительный риск с 10-летним минимальным латентным периодом составил 0,84/Гр, 95% доверительный интервал: 0,24–1,55 и с 5-летним минимальным латентным периодом – 0,83 (0,24–1,55) соответственно). Получены достоверные оценки избыточного относительного риска в отдельных группах когорты (по полу, возрасту на начало облучения, области проживания на момент облучения).*

Ключевые слова: *избыточный относительный риск, риск смерти, солидные злокачественные новообразования, хроническое облучение, когортное исследование.*

Введение

Высокая чувствительность к индукции развития злокачественных новообразований (ЗНО) воздействием радиации, обусловленная высокой пролиферативной и метаболической активностью тканей, у детей и подростков примерно в 2–3 выше, чем у взрослых [1].

В связи с повышенной радиочувствительностью детского организма оценка риска развития ЗНО является важной задачей современной радиобиологии и радиационной эпидемиологии.

После аварии на Чернобыльской АЭС было проведено немалое количество исследований, посвященных медицинским эффектам ионизирующего излучения у облученных в детском возрасте [1–3]. Однако многие из них не имели должной дозиметрической поддержки, и результаты этих исследований были достаточно противоречивыми.

Ранние исследования, проведенные в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ), посвященные анализу эффектов пренатального облучения и облучения в раннем детском возрасте у населения, проживавшего в населенных пунктах на реке Тече, выявили положительный риск смерти от солидных ЗНО и лейкозов. Однако риск был статистически не значимым [4]. Исследования эффектов облучения в когортах населения, облученного на реке Тече [5] и на Восточно-уральском радиоактивном следе (ВУРС) [6], включающих все возрастные группы, показали статистически значимый риск смерти от солидных ЗНО. Кроме того, достоверный риск смерти от солидных ЗНО был выявлен в Уральской когорте аварийно-облученного населения (УКАОН), объединяющей население, подвергшееся облучению в прибрежных селах реки Течи и на территории ВУРСа [7].

Силкин Станислав Сергеевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

В 2019 г. в УНПЦ РМ на базе УКАОН была сформирована Уральская когорта населения, включающая лиц, облученных на Южном Урале в двух радиационных авариях в возрасте моложе 20 лет [8]. Анализ риска заболевания солидными ЗНО в этой когорте показал наличие статистически значимой зависимости уровня заболеваемости ЗНО от поглощенной дозы [9]. В текущей работе приводятся результаты анализа риска смерти от солидных ЗНО в изучаемой когорте.

Материалы и методы

Когорта

Изучаемая когорта была создана путем выделения из УКАОН лиц, облученных в возрасте моложе 20 лет, далее обозначаемая как УКАОН-19. Население Южного Урала подверглось хроническому облучению в результате сбросов производственным объединением «Маяк» жидких радиоактивных отходов в реку Течу и теплового взрыва в хранилище радиоактивных отходов в сентябре 1957 г., приведшего к образованию ВУРС.

Критериями включения в УКАОН-19 являются: 1) проживание в период с 1.1.1950 г. по 31.12.1960 г. на территории Челябинской или Курганской области в 41 населенном пункте на реке Тече или в период с 29.09.1957 г. по 31.12.1960 г. в 34 населенных пунктах на территории ВУРС в Челябинской области; 2) возраст начала облучения 0–19 лет включительно.

Критерием исключения являлась противоречивая информация о местах или времени проживания в данных населенных пунктах, что делало невозможным расчет индивидуализированных доз [8].

Территория наблюдения (ТН) за смертностью от ЗНО включала в себя всю Челябинскую и Курганскую области, что значительно больше, чем ТН за заболеваемостью ЗНО (которая включает только 5 районов Челябинской области, г. Челябинск и г. Озерск), и связано с возможностью систематического сбора информации о причинах смерти на данной территории. Период наблюдения за смертностью начинается с 1950 г., что раньше, чем за заболеваемостью (информация о которой доступна с 1956 г.). В связи с указанными отличиями численность аналитической когорты для анализа смертности отличается от таковой для заболеваемости и составляет 32 762 человека. Относительно жизненного статуса на конец периода наблюдения известно, что из 32 762 человек, входящих в когорту УКАОН-19, 39% (9968 человек) членов когорты живы, 50% (12 501 человек) умерло. На 93% умерших имеется акты с указанием причины смерти, что считается удовлетворительным показателем при столь длительном периоде наблюдения. Также известно, что 11% (2810 человек) считаются потерянными, 23% (7483 человека) мигрировали с ТН.

Демографические характеристики УКАОН-19 и распределение случаев смерти от ЗНО представлены в таблице 1.

Демографические характеристики когорты и случаи смерти от ЗНО за 1950–2020 гг.

Таблица 1

[Table 1

Demographic characteristics of the cohort and solid cancer death cases for 1950–2020]

Характеристики когорты [Cohort characteristics]	Число человек [Number of persons]		Солидные ЗНО на ТН [Solid cancers in catchment area]		Средняя поглощенная доза, Гр [Mean absorbed dose, Gy]
	N	%	N	%	
<i>Пол [Sex]</i>					
Мужчины [Male]	16 326	50	1098	61	0,04
Женщины [Female]	16 436	50	690	39	0,04
<i>Этнический состав [Ethnicity]</i>					
Русские [Russians]	22 189	68	1182	66	0,06
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	10 573	32	606	34	0,03
<i>Область проживания на начало облучения [Territory of the beginning of exposure]</i>					
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	25 323	77	1487	83	0,05
Курганская область [Kurgan Oblast]	7439	23	301	17	0,01
<i>Причина облучения [Accident of exposure]</i>					
Облучен только на реке Тече [Techa River exposed]	22 157	68	1320	74	0,04
Облучен на реке Тече и на ВУРСе [Techa River and EURT exposed]	1181	4	77	4	0,23
Облучен только на ВУРСе [EURT exposed]	9424	29	391	22	0,01
<i>Возраст на начало облучения, лет [Age of beginning of exposure, years]</i>					
0–4	20 418	62	662	37	0,03
5–9	1777	5	252	14	0,06
10–19	10 567	32	874	49	0,06
Всего в УКАОН-19 [Total]	32 762	100	1788	100	0,04

В УКАОН-19 равное число мужчин и женщин – по 50%. Преобладает русское население (68%), этническая группа татар и башкир составляет 32%. Большая часть когорты на начало периода наблюдения проживало на территории Челябинской области (77%), остальные – на территории Курганской области (23%). Большинство лиц из когорты (68%) были облучены в населенных пунктах на реке Тече. Лица, облученные в населенных пунктах ВУРСа, составили 29%. В обеих авариях были облучены 4% членов УКАОН-19. На момент начала облучения дети до 5 лет составляли 62%, от 5 до 9 лет – 5%, 10–19 лет – 32%.

Больше половины смертей от ЗНО зарегистрировано в когорте у мужского населения (61%), по этническому признаку распределение ЗНО соответствует доле населения в когорте: 66% ЗНО у 68% русского населения, остальные 34% ЗНО зарегистрированы у татар и башкир. Преобладает количество смертей от ЗНО у лиц, проживавших на территории Челябинской области (83%). На территории Курганской области доля составила 17%. По возрасту больше всего смертей от ЗНО зарегистрировано у лиц, которым на начало облучения было от 10 до 19 лет (49%), затем от 0 до 4 лет (37%) и от 5 до 9 лет (14%). Это обусловлено достижением более старшего возраста к концу периода наблюдения. Преобладающее количество ЗНО (74%) зарегистрировано у лиц, проживавших только в населенных пунктах реки Течи, у облученных только на ВУРСе – 22%; и на реке, и на ВУРСе – 4%.

Дозы облучения

Индивидуализированные дозы для членов УКАОН-19 были рассчитаны по усовершенствованной дозиметрической системе TRDS-2016 с учетом мест и периода проживания в населенных пунктах на реке Тече и ВУРСе [10–13]. Население, входящее в УКАОН-19, подверглось хроническому комбинированному (внешнему и внутреннему) облучению: внешнее – за счет загрязненной радионуклидами почвы, внутреннее обусловлено поступлением радионуклидов в организм с продуктами питания с загрязненных территорий и водой. Преимущественному облучению подвергся красный костный мозг (ККМ) за счет инкорпорации ^{90}Sr в костную ткань. Другие ткани и органы облучались более равномерно и в значительно меньшей степени. Вклад внутреннего облучения для членов УКАОН-19 варьировал от 0,3% до 100%, составляя в среднем 45%. Накопление дозы на мягкие ткани у членов когорты практически прекратилось в 1985 г.

В качестве реперной дозы для анализа риска смерти от солидных ЗНО использовалась доза на желудок, близкая к уровням облучения большинства внескелетных тканей. Средняя доза, накопленная у членов когорты в стенках желудка за весь период наблюдения, составила 0,04 Гр, максимальная – 1,1 Гр. При анализе дозовой зависимости риска смерти от солидных ЗНО использовалась доза с учетом минимального латентного периода (МЛП), необходимого для реализации ЗНО. Например, при 5-летнем МЛП и регистрации ЗНО в 1970 г. считалось, что на развитие ЗНО повлияла доза, накопленная уже к 1965 г., поэтому доза с учетом МЛП несколько отличалась. Средняя доза с 10-летним МЛП, использованная для расчета окончательной величины риска, составила 0,037 Гр.

Как видно на рисунке 1, 88% всех человеко-лет под риском приходится на диапазон малых доз (до 0,1 Гр). Всего 1% приходится на дозовую группу выше 0,5 Гр.

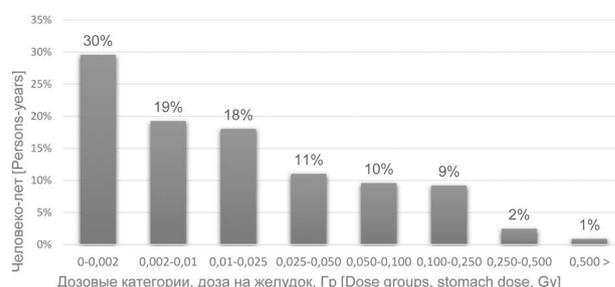


Рис. 1. Дозовое распределение человеко-лет под риском [Fig. 1. Dose distribution of person-years]

Структура причин смерти от ЗНО

За период с 1950 по 2020 г. в УКАОН-19 на территории наблюдения было зарегистрировано 1935 случаев смерти от всех ЗНО, из них 1788 случаев солидных ЗНО, 121 случай гемобластозов. У мужского населения преобладали случаи смерти от ЗНО бронхов и легкого (384 случая, 35% от всех солидных ЗНО), желудка (139 случаев, 13%), простаты и других мужских половых органов (62 случая, 6%), толстого кишечника (54 случая, 5%) (рис. 2).

У женщин самыми частыми локализациями были молочная железа (93 случая, 13% от 690 солидных ЗНО у женщин), шейка и тело матки (80 случаев, 12%), желудок (78 случаев, 11%), яичник и другие женские половые органы (58 случаев, 8%), толстый кишечник и прямая кишка (по 53 случая, 8%).

Была проанализирована структура случаев смерти в зависимости от возраста начала облучения (0–4 года, 5–9 лет, 10–19 лет). Не было выявлено выраженных отличий в структуре причин смерти, кроме небольшого увеличения доли смерти от ЗНО отдельных локализаций у начавших облучаться в более старшем возрасте. В группе возраста начала облучения в 10–19 лет наблюдалось увеличение доли умерших от ЗНО желудка, толстого кишечника, прямой кишки, что ожидаемо, т.к. эти локализации являются возрастными ЗНО.

Методы анализа

При анализе использован когортный метод с применением внутреннего контроля. Контролем выступили члены когорты с наименьшей поглощенной дозой. Для расчета показателей смертности использованы стандартные методы расчета коэффициентов смертности на 100 тысяч человеко-лет. Расчет избыточного относительного риска (ИОР) сделан в программах Datab и Amfit статистического пакета Epicure [14]. Статистическая значимость и доверительные интервалы (ДИ) определялись методом максимального правдоподобия. Вероятность ошибки оценивалась менее чем в 5%.

Анализ риска смерти от ЗНО проводился с использованием простой параметрической модели ИОР на основе Пуассоновской регрессии. Модель ИОР представлена формулой:

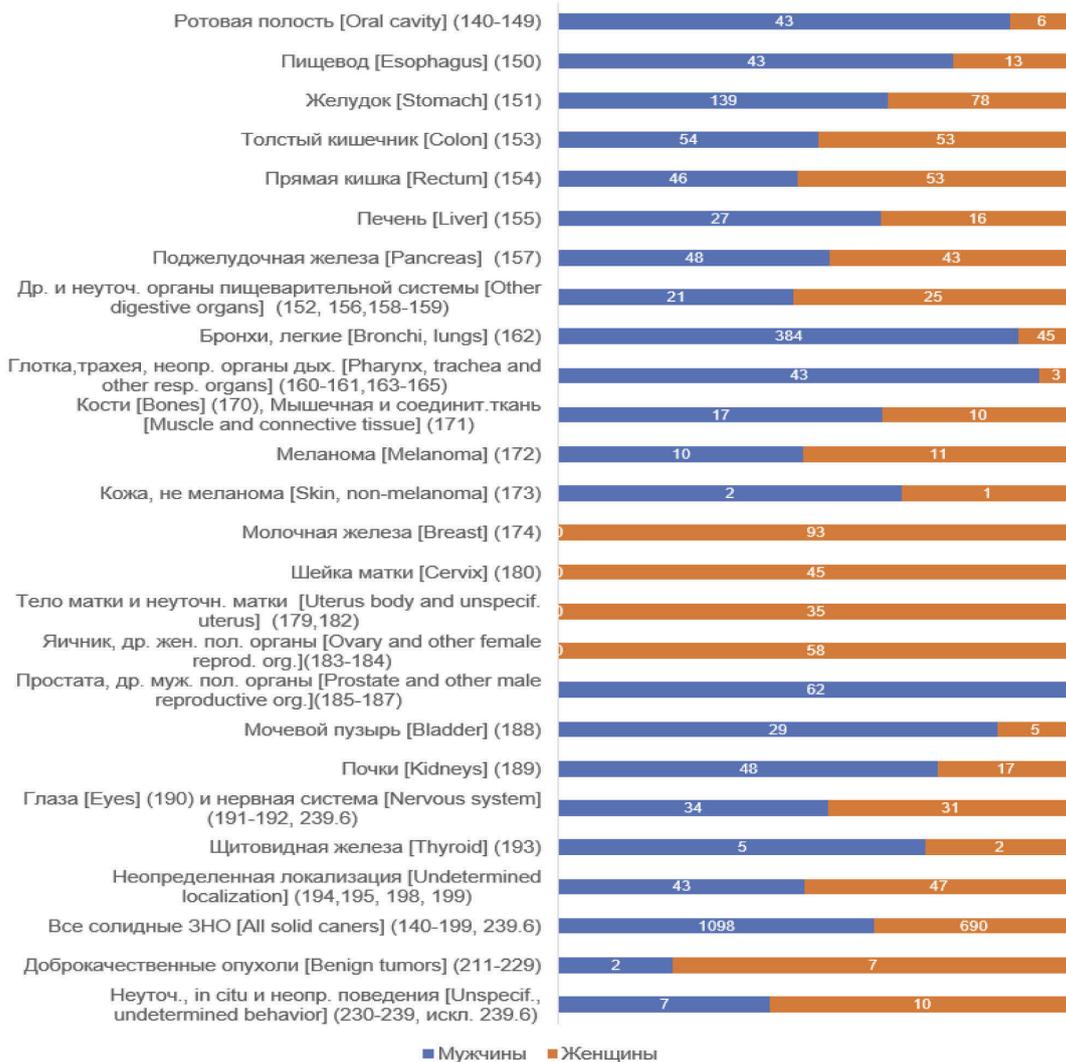


Рис. 2. Распределение случаев смерти от ЗНО по полу и рубрикам МКБ-9
 [Fig. 2. Distribution of death cases by gender and ICD-9]

$$\lambda(a, d, z) = \lambda_0(a, z_0) (1 + p(d)\varepsilon(z_i)) \quad (1)$$

где $\lambda(a, d, z)$ – общий риск заболеваемости ЗНО в зависимости от достигнутого возраста (a), дозы (d) и других факторов (z); z_0 – другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни (λ_0), z_i – факторы, которые могут модифицировать ИОР. Избыточный риск описывается как произведение функции дозового ответа $p(d)$ на функцию модификации эффекта ($\varepsilon(z_i)$).

В программе Datab созданы таблицы человеко-лет и случаев ЗНО со стратификацией по полу, этнической группе (2 категории: русские, татары и башкиры), факту переселения населенного пункта (переселенные и не переселенные), территории наблюдения, календарному периоду (15 категорий по 5 лет с 1950 по 2020 г.), дозовым категориям (с нижними границами в 0, 2, 10, 25, 50, 100, 250, 500 и более мГр), достигнутому возрасту (9 категорий по 10 лет, от 0 до 80 лет и старше), возрасту на начало облучения (4 категории: 0–4, 5–9, 10–14, 14–19 лет), времени после облучения (по 5 лет от 0 до 50 лет и больше), наличие ЗНО у родственников первой линии родства

(3 категории: нет ЗНО, есть, не известно), области проживания на момент облучения (Челябинская и Курганская), факту облучения на реке Тече или на ВУРСе либо в результате обеих аварий,) периоду наблюдения (до 1985 г. и после), курению (3 категории: курит, не известно, не курит), индексу массы тела (3 категории: нормальный вес, избыточный, не известно), городской/сельский житель (городским считался житель, который после миграции из сельской местности прожил в городе не менее 10 лет). Стратификация по вышеперечисленным характеристикам дала возможность коррекции базовых уровней смертности при значимой зависимости от каких-либо из этих факторов.

Результаты и обсуждение

Расчет базовых уровней смертности

В начале анализа для расчета базовых уровней смертности проведена оценка значимости влияния перечисленных выше факторов на уровень смертности от солид-

ных ЗНО при включении их в модель оценки риска. Была оценена статистическая значимость влияния каждого из доступных факторов при включении их в модель в различных сочетаниях. Были выявлены следующие статистически значимые параметры: пол ($p < 0,001$), этническая принадлежность ($p = 0,01$), период наблюдения до 1985 г. и после ($p = 0,01$), область проживания на момент облучения ($p = 0,002$), наличие ЗНО у родственников первой линии родства ($p < 0,001$), логарифмическая половозрастная зависимость достигнутого возраста ($p < 0,001$), курение ($p < 0,001$), городской/сельский житель ($p < 0,001$). В итоге расчет базовых уровней в модели ИОР был проведен с учетом корректировки влияния каждого из указанных факторов на уровень смертности от солидных ЗНО.

Анализ дозовой зависимости

Для оценки характера дозовой зависимости тестировались линейная, квадратичная и линейно-квадратичная модели. В итоге было определено, что зависимость ИОР от поглощенной дозы наилучшим образом описывалась линейной моделью. Величина ИОР смерти от солидных ЗНО в УКАОН-19 при тестировании линейной модели с 10-летним МЛП была статистически значимой и составляла 0,84/Гр (95% ДИ: 0,24-1,55, $p = 0,004$), значение AIC=14471,137. Критерий AIC (информационный критерий Акаике) применяется для выбора модели. Чем меньше его значение, тем лучше подгонка модели. Добавление квадратичного компонента к линейному не улучшало подгонку модели ($p = 0,075$). Оценка ИОР при тестировании квадратичной модели оказалась статистически незначимой (0,98/Гр, 95% ДИ: -0,05; 2,26, $p = 0,062$, AIC=14475,805).

На рисунке 3 представлены линейная модель с доверительными интервалами, квадратичная модель и оценки ИОР в дозовых группах.

Как проиллюстрировано на рисунке 3, точечные оценки ИОР в дозовых группах и линия квадратичной модели находятся внутри области между ДИ линейной модели, что подтверждает, что в области доз ниже 1 Гр дозовая зависимость ИОР хорошо описывается линейной моделью.

Тестирование влияния 4 МЛП на величину ИОР (0, 2, 5, 10 лет), необходимых для реализации случаев ЗНО по-

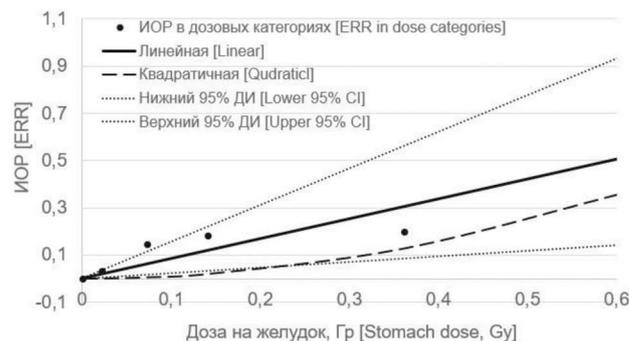


Рис. 3. Дозовая зависимость ИОР смерти от солидных ЗНО [Fig. 3. Dose dependence of solid cancer mortality ERR]

сле радиационного воздействия, показало практически идентичные значения ИОР с одинаковой статистической значимостью. Однако наименьшую относительную ширину ДИ имел ИОР при 10-летнем МЛП. В связи с указанным дальнейший анализ возможной модификации эффекта нерадиационными факторами проведен с использованием 10-летнего МЛП как более корректного с точки зрения статистической значимости. Для возможности сопоставления величины риска с другими исследованиями, где используется 5-летний МЛП, приводим также значение ИОР смерти в УКАОН-19 с 5-летним МЛП, которое составило 0,83/Гр (95% ДИ: 0,24-1,55; $p = 0,004$).

Распределение случаев смерти от солидных ЗНО, наблюдаемых на территории наблюдения, числа человеко-лет и атрибутивного риска по дозовым группам, рассчитанное на основе линейной модели с 10-летним МЛП, представлено в таблице 2.

Атрибутивный риск рассчитывался как доля избыточных случаев смерти от солидных ЗНО от суммы избыточных и базовых случаев, рассчитанных по модели. Согласно линейной модели, с увеличением дозы происходит увеличение доли избыточных случаев смерти от ЗНО. Исходя из величины атрибутивного риска, у членов УКАОН-19 в дозовой группе выше 0,5 Гр дополнительные случаи смерти от ЗНО, связанные с облучением, могут составить до 35,7%. За весь 71-летний период наблюде-

Таблица 2
Распределение случаев смерти от солидных ЗНО, человеко-лет, атрибутивного риска по дозовым группам в когорте
[Table 2
Distribution of solid cancer death cases, person-years, attributable risk by dose categories in the cohort]

Дозовые категории, Гр [Dose categories, Gy]	Солидные ЗНО [Solid cancers]	Человеко-годы [Person-years]	Случаи по линейной модели [Death cases according to the linear model]		
			Избыточные случаи	Базовые случаи	Атрибутивный риск, %
0-	716	721 921	1,6	739,9	0,2
0,01-	556	280 001	10,6	538,8	1,9
0,05-	205	95 489,5	11	179,5	5,4
0,1-	221	89 017,4	22,2	187,5	10,0
0,25-	60	24 115,8	15,5	50,1	25,8
0,5>	30	83 12,48	10,7	20,6	35,7
Вся когорта [Whole cohort]	1788	1 218 855,3	71,6	1716,4	4,0

ния у членов УКАОН-19 атрибутивный риск составил 4%, т.е. из 1788 случаев смерти от солидных ЗНО 72 могли быть вызваны облучением.

*Модификация дозового ответа
нерадиационными факторами*

Достаточная численность когорты и длительный период наблюдения позволили получить статистически значимые значения ИОР для отдельных групп и провести их корректное

сравнение. Была проведена оценка возможной модификации такими факторами, как пол, этническая принадлежность, факт переселения, возраст на начало облучения, достигнутый возраст, принадлежность к аварии (проживание в прибрежных селах реки Течи и населенных пунктах ВУРСа), факт облучения родителей, наличие ЗНО у родственников.

В таблице 3 представлены величины ИОР в каждой из исследуемых групп, рассчитанные по линейной модели с 10-летним МЛП.

Таблица 3

Модификация ИОР смерти от солидных ЗНО нерадиационными факторами

[Table 3]

Cancer mortality ERR modification by factors unrelated to exposure]

Факторы [Factors]]	ИОР/Гр(95% ДИ) [ERR/Gy (95% CI)]	P
Вся когорта [Whole cohort]	0,84(0,24;1,55)	0,009
<i>Пол [Sex]</i>		
Мужчины [Male]	0,17(-0,43;0,94)	>0,05
Женщины [Female]	2,1(0,92;3,50)	<0,001
<i>Этническая принадлежность [Ethnicity]</i>		
Татары/башкиры [Tatars/Bashkirs]	1,77(0,53;3,34)	0,007
Русские [Russians]	0,52(-0,10;1,28)	0,14
<i>Факт переселения [Resettlement]</i>		
Переселенные [Resettled]	0,83(0,23;1,54)	0,01
Непереселенные [Non-resettled]	2,36(0,29;4,78)	0,03
<i>Область облучения [Territory of exposure]</i>		
Челябинская [Chelyabinsk Oblast]	0,86(0,25;1,58)	0,008
Курганская [Kurgan Oblast]	-1,74(nf<0;5,94)	>0,5
<i>Жители города/села [City or village resident]</i>		
Сельские жители [Village]	0,58(-0,04;1,33)	0,09
Городские жители [City]	1,76(0,46;3,43)	0,01
<i>Статус облучения [Exposure status]</i>		
Родитель не облучен [Parents are not exposed]	0,85(0,24;1,57)	0,009
Родитель облучен или внутриутробное облучение [Parents are exposed or exposed in utero]	0,66(-1,22;3,09)	>0,5
<i>ЗНО у родственников первой линии родства [Cancer in relatives]</i>		
Нет ЗНО [No cancer]	0,91(-0,02;2,06)	0,07
Есть ЗНО [Have cancer]	0,83(0,1;1,74)	0,04
Не известно [Unknown]	-0,3(nf<0;5,95)	>0,5
<i>Возраст начала облучения [Age at exposure beginning, years]</i>		
1 год [1 years old]	1,69(0,39;3,27)	0,01
5 лет [5 years old]	1,15(0,09;2,04)	0,004
10 лет [10 years old]	0,71(nf<0;1,49)	>0,05
<i>Достигнутый возраст [Attained age, years]</i>		
30 лет [30 years]	0,33(nf<0;1,73)	>0,5
60 лет [60 years]	0,83(0,24;nf>1,14)	>0,05
<i>Причина/авария облучения [Cause of exposure]</i>		
Только река Теча [Techa River only]	0,86(0,25;1,57)	0,008
Только ВУРС [EURT only]	0,05(-2,61;3,34)	>0,5

Не для всех рассматриваемых групп были получены достоверные оценки риска. Полученные результаты не выявили статистически значимой модификации риска каким-либо из анализируемых факторов. Можно говорить только о наблюдаемых тенденциях. Точечная величина ИОР у женщин (2,1/Гр, 95% ДИ: 0,92–3,50, $p < 0,001$) выше, чем у мужчин и чем во всей когорте, но различия статистически незначимы. Данная тенденция наблюдается и в результатах большинства других когортных исследований радиогенного риска.

При оценке фактора этнической принадлежности наблюдался высокий статистически значимый ИОР у татар и башкир (1,77/Гр, 95% ДИ: 0,53–3,34, $p = 0,007$), у русских, напротив, не получено значимой оценки ($p = 0,14$), поэтому корректное сравнение затруднено.

Факт переселения не повлиял на величину дозового ответа. Статистически значимые величины ИОР получены как у переселенных членов когорты (0,83/Гр, 95% ДИ: 0,23–1,54, $p = 0,01$), так и у непереселенных (2,36/Гр, 95% ДИ: 0,29–4,78, $p = 0,03$), но достоверных отличий не наблюдается, ДИ величин ИОР у них перекрываются.

Достоверных отличий величины ИОР, связанных с областью облучения и проживания, не наблюдалось. В Курганской области величина риска указывала на большие неопределенности, имела отрицательное значение и большой диапазон ДИ, что, скорее всего, связано с недостаточной статистикой (средняя доза была ниже, чем у жителей загрязненных населенных пунктов Челябинской области (10 мГр), число жителей составляло 1/3 от всей когорты. Величина ИОР в Челябинской области соответствовала таковой во всей когорте (ИОР равен 0,86/Гр, 95% ДИ: 0,25–1,58, $p = 0,008$).

При оценке величины ИОР в зависимости от статуса облучения родителей выявлен статистически значимый ИОР у лиц, чьи родители не были облучены (0,85/Гр, 95% ДИ: 0,24–1,57, $p = 0,009$), соизмеримый с риском по когорте. У лиц, чьи родители были облучены или они облучались внутриутробно, ИОР был незначимым ($p > 0,5$). Эта группа представлена лицами, чье облучение произошло в более позднем периоде, следовательно, накопленная доза у них значительно ниже. Также можно предположить отсутствие влияния облучения родителей на радиационный риск солидных ЗНО.

Величина риска у членов когорты, которые начали облучаться в раннем детском возрасте, статистически значима и выше, чем в целом по когорте. ИОР у начавших облучаться в возрасте 1 год равен 1,69/Гр, 95% ДИ: 0,39–3,27, $p = 0,01$, в возрасте 5 лет ИОР составил 1,15/Гр, 95% ДИ: 0,09–2,04, $p = 0,004$. Однако различия недостоверны. Величина ИОР у лиц, начавших облучаться в возрасте 10 лет, статистически не значима ($> 0,05$). Различия в ИОР между возрастными группами также недостоверны.

При оценке изменений ИОР с увеличением достигнутого возраста были проанализированы риски при достижении возраста 30 лет и 60 лет. В обоих случаях величина ИОР была незначимой ($p > 0,5$).

Заключение

Анализируемая когорта (УКАОН-19) включает лиц, постнатально облученных в возрасте моложе 20 лет в двух радиационных авариях на Южном Урале в период с начала 1950 г. по конец 1960 г. Численность УКАОН-19 составила 32 762 человека. За период с 1950 по 2020 г. на тер-

ритории наблюдения (Челябинская и Курганская области) было зарегистрировано 1788 смертей от солидных ЗНО. Индивидуальные дозы на желудок рассчитаны по обновленной дозиметрической системе TRDS-2016. Средняя поглощенная доза в когорте, накопленная за весь период наблюдения, составила 0,04 Гр, максимальная – 1,1 Гр.

В результате анализа риска смерти от солидных ЗНО в УКАОН-19 выявлен статистически значимый ИОР, равный 0,84/Гр (95% ДИ: 0,24–1,55, $p = 0,004$), рассчитанный при 10-летнем МЛП и линейной модели. Анализ факторов возможной модификации дозового ответа не выявил статистически значимого влияния исследуемых факторов на величину риска. При этом была отмечена тенденция к более высокой величине риска смерти при возрасте начала облучения в 1 год ИОР/Гр 1,69 (95% ДИ: 0,39;3,27) и в 5 лет ИОР/Гр 1,15 (95% ДИ: 0,09;2,04).

Ранее, в 2021 г., у членов данной когорты было проведено исследование риска заболеваемости солидными ЗНО за период с 1956 по 2018 г., результаты которого показали наличие линейной зависимости ИОР заболевания солидными ЗНО от постнатальной дозы (при 5-летнем МЛП ИОР равен 0,66/Гр, 95% ДИ: 0,18–1,22, $p = 0,006$) [9]. Сравнение данной величины риска заболеваний солидными ЗНО и риска смерти от ЗНО в УКАОН-19 (при 5-летнем МЛП ИОР/Гр составил 0,83; 95% ДИ: 0,24–1,55) достоверных отличий не выявило.

Сравнение с показателями риска смерти от солидных ЗНО в УКАОН, включающей все возрасты начала облучения [7], также указывает на хорошее соответствие величин ИОР с отсутствием статистически значимых различий, но при этом наблюдается тенденция к увеличению риска при облучении в возрасте моложе 20 лет, относительно всех возрастов: в УКАОН при 5-летнем МЛП ИОР 0,78/Гр (95% ДИ 0,37–1,12), $p < 0,001$; в УКАОН-19 с 5-летним МЛП ИОР равен 0,83/Гр (95% ДИ: 0,24–1,55; $p = 0,004$), а при 10-летнем МЛП – 0,84/Гр (95% ДИ: 0,24–1,55), $p = 0,004$.

Длительный период наблюдения и достаточная численность когорты за счет объединения населения, облученного в молодом возрасте на Южном Урале в двух авариях, дали возможность получить статистически значимые значения ИОР не только для всей когорты, но и для отдельных групп. Однако, учитывая относительно молодой возраст членов когорты, можно ожидать, что дальнейшее наблюдение приведет к увеличению случаев ЗНО, реализация которых происходит преимущественно после 60-летнего возраста, и увеличит статистическую силу результатов расчета.

Также в будущем планируется оценка риска смерти и заболеваний ЗНО отдельных локализаций у облученных в детском возрасте на Южном Урале.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Силкин С.С. – анализ риска, интерпретация данных, написание статьи.

Крестинина Л.Ю. – дизайн исследования, анализ риска, обсуждение результатов, подготовка разделов статьи.

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам биофизической лаборатории УНПЦ РМ (М.О. Дегтевой).

Е.А. Шишкиной, Е.И. Толстых) за расчет оценок индивидуальных доз, а также сотрудникам отдела Базы данных «Человек» УНПЦ РМ под руководством Старцева Н.В. за данные регистров медико-дозиметрической базы данных УНПЦ РМ, а также сотрудникам эпидемиологической лаборатории и лично Епифановой С.Б. за подготовку данных к анализу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

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

Литература

1. UNSCEAR 2013. Report. Volume II. SCIENTIFIC ANNEX B: Effects of radiation exposure of children. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. VOLUME II Scientific Annex B. 2013. Vol. 13-87320. 271 p.
2. Hatch M., Brenner A., Bogdanova T. et al. A screening study of thyroid cancer and other thyroid diseases among individuals exposed in utero to iodine-131 from Chernobyl fallout // The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism. 2009. Vol. 94, No. 3. P. 899-906. doi: 10.1210/jc.2008-2049.
3. Neta G., Hatch M., Kitahara C.M. et al. In utero exposure to iodine-131 from Chernobyl fallout and anthropometric characteristics in adolescence // Radiation Research. 2014. Vol. 181, No. 3. P. 293-301. doi: 10.1667/RR13304.1.
4. Ostroumova E.V., Akleyev A.V. Cancer Mortality Among Techa Riverside Residents (Southern Urals), Chronically Exposed to Radiation During the Prenatal Period and in Childhood. 11th International Congress of the International Radiation Protection Association [Internet]. Madrid, Spain. 2004. URL: irpa11.irpa.net/pdfs/1b21.pdf. 2003. (Дата обращения: 15.11.2023).
5. Schonfeld S.J., Krestinina L.Yu., Epifanova S. et al. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950-2007) // Radiation Research. 2013. Vol. 179. P. 183-189.
6. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю. Анализ смертности от злокачественных новообразований в когорте населения, облученного на Восточно-Уральском радиоактивном следе за 57-летний период // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21, № 2. С. 258-265.
7. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1950–2019 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 19-31. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31.
8. Шалагинов С.А., Крестинина Л.Ю. Уральская когорта населения, облученного в детском возрасте // Радиационная гигиена. 2020. Т.13, № 1. С. 91–93. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-91-93.
9. Крестинина Л.Ю., Шалагинов С.А., Силкин С.С. и др. Радиогенный риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у лиц, облученных на Южном Урале в детском возрасте // Радиационная гигиена. 2021. Т.14, № 1. С. 49-59. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-49-59.
10. Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O., Napier B.A. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011) // Radiation and Environmental Biophysics. 2017. Vol. 56, № 1. P.17-45. DOI 10.1007/s00411-016-0677-y.
11. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90 // Health Physics. 2011. Vol. 101, No. 1. P. 28–47.
12. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: 137Cs // Health Physics. 2013. Vol. 104, No. 5. P. 481–498.
13. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I. et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures // Health Physics. 2019. Vol. 117, № 4. P. 378–387.
14. Preston D.L., Lubin J.H., Pierce D.A., McConney M.E. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.

Поступила: 24.11.2023 г.

Силкин Станислав Сергеевич – кандидат медицинских наук, исполняющий обязанности старшего научного сотрудника эпидемиологической лаборатории, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ssilkin@urcrm.ru

ORCID: 0000-0002-4412-4481

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

Для цитирования: Силкин С.С., Крестинина Л.Ю. Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте населения, облученного в возрасте до 20 лет // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 76-85. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-76-85

Solid cancer mortality risk in the cohort of Urals population exposed to radiation for up the age of 20

Stanislav S. Silkin, Lyudmila Yu. Krestinina

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

The objective of the current study is the direct assessment of the excess relative risk of solid cancer mortality in people affected by low dose-rate chronic exposure mainly in low-to medium dose range (up to 1 Gy) at the age of <20. The study cohort consists of the population exposed at the age of <20 as a result of two large radiation accidents at the “Mayak” Production Association. The size of the cohort is 32,762 persons, follow-up period – 71 years (from 1950 through 2020), the number of person-years at risk is – 1 218 855. For this cohort the mortality catchment area includes Chelyabinsk and Kurgan Oblasts. Over a 71-year follow-up period 1,788 solid cancer deaths were registered in the cohort. Mean dose accumulated in the stomach walls over the whole follow-up period was 0.04 Gy, maximum dose was 1.1 Gy. Statistical processing of data was performed using Amfit and Datab software packages (Epicure statistics software package). Solid cancer mortality risk was analyzed with the Poisson regression using simple parametric excess relative risk model. Statistical significance of the results was estimated using the maximum likelihood method with 95% probability. For the first time the direct assessments of the excess relative risk of solid cancer mortality have been obtained in the Urals Cohort of population exposed at age <20 for a 71-year period (Excess Relative Risk was 0.84/Gy, 95% confidence interval: 0.24–1.55 for 10-years minimal latency period and 0.83 (0.24–1.55) for 5-year minimal latency period). Statistically significant estimates of the excess relative risk have been obtained for specific groups within the cohort selected according to the sex, age at the onset of exposure, and Oblast of residence at the time of exposure.

Key words: excess relative risk, death risk, solid cancer mortality, chronic exposure, cohort study.

Authors' personal contribution

Silkin S.S. – risk analysis, data interpretation, article design, article writing.

Krestinina L.Yu. – development of study design, risk analysis, discussion of results, preparation of sections of the article.

Acknowledgments

We express our gratitude to the staff of the biophysical laboratory of the Ural Research Center for Radiation Medicine (M.O. Degteva, E.A. Shishkina, E.I. Tolstykh) for calculating estimates of individual doses, as well as to the staff of the Human Database department under the leadership of N.V. Startsev for data from the registers of the medical and dosimetric database of the URCRM, as well as to the employees of the epidemiological laboratory and personally S.B. Epifanova for preparing the data for analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

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

References

1. UNSCEAR 2013. Report. Volume II. SCIENTIFIC ANNEX B: Effects of radiation exposure of children. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. VOLUME II Scientific Annex B. 2013. Vol. 13-87320. 271 p.
2. Hatch M, Brenner A, Bogdanova T, Derevyanko A, Kuptsova N, Likharev I, et al. A screening study of thyroid cancer and other thyroid diseases among individuals exposed in utero to iodine-131 from Chernobyl fallout. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 2009;94(3): 899-906. doi: 10.1210/jc.2008-2049.
3. Neta G, Hatch M, Kitahara CM, Ostroumova E, Bolshova EV, Tereschenko VP, et al. In utero exposure to iodine-131 from Chernobyl fallout and anthropometric characteristics in adolescence. *Radiation Research*. 2014;181(3): 293-301. doi: 10.1667/RR13304.1.
4. Ostroumova EV, Akleyev AV. Cancer Mortality Among Techa Riverside Residents (Southern Urals), Chronically Exposed to Radiation During the Prenatal Period and in Childhood. 11th International Congress of the International Radiation Protection Association [Internet]; 2004 May 23-28; Madrid, Spain. – Available from: irpa11.irpa.net/pdfs/1b21.pdf. 2003. (Accessed 15 November 2023).
5. Schonfeld SJ, Krestinina LY, Epifanova S, Degteva MO, Akleyev AV, Preston DL. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950-2007). *Radiation Research*. 2013;179: 183-189.
6. Silkin SS, Krestinina LY. Analysis of 57 years mortality from malignant neoplasms in a population cohort, irradiated in the

Stanislav S. Silkin

Ural Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ssilkin@urcrm.ru

- East-Ural radioactive trace. *Meditsina ekstremalnykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(2): 276-283. (In Russian).
7. Krestinina LYu, Silkin SS. Solid cancer mortality risk in the Southern Urals populations exposed to radiation cohort: 1950-2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 19-31. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31>.
 8. Shalaginov SA, Krestinina LYu. Ural cohort of the population exposed in childhood. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 91-93. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-91-93.
 9. Krestinina LYu, Shalaginov SA, Silkin SS, Epifanova SB, Akleyev AV. Radiogenic risk of solid cancer incidence in persons exposed to radiation in childhood in the Southern Urals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 49-59. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-49-59.
 10. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). *Radiation Environmental Biophysics*. 2017;56(1): 27-45. DOI:10.1007/s00411-016-0677-y.
 11. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Shishkina EA, Krivoschapov VA, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Physics*. 2011;101(1): 28-47.
 12. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of longlived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Physics*. 2013;104(5): 481-98.
 13. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AY, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose From Environmental Exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
 14. Preston DL, Lubin J., Pierce DA, McConney ME. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.

Received: November 24, 2023

For correspondence: Stanislav S. Silkin – candidate of medical science, acting senior researcher of the epidemiological laboratory, Ural Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (Vorovsky str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ssilkin@urcrm.ru)

ORCID: 0000-0002-4412-4481

Lyudmila Yu. Krestinina – candidate of medical sciences, head of the epidemiological laboratory, Ural Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

For citation: Silkin S.S., Krestinina L.Yu. Solid cancer mortality risk in the cohort of Urals population exposed to radiation for up the age of 20. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 76-85. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-76-85

Experience of using the portable gamma spectrometer MKS AT6101D for *in situ* measurements of the density of ^{137}Cs soil contamination in the Bryansk region of Russia

Valery P. Ramzaev, 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 Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

We have tested applicability of the commercially available portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D (the manufacturer: ATOMTEX, Belarus) to measure the density of ^{137}Cs soil contamination (inventory of ^{137}Cs in soil) in situ. The study was performed in 2015–2020 at the territories of the Bryansk region of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. The in situ measurements were performed in the 17 ground plots (7 grasslands and 10 kitchengargens) for which the ^{137}Cs inventory and the mean migration depth of the radionuclide in soil was available from laboratory (ex situ) measurements of soil samples. It was found that the in situ data obtained with the method that was provided by the manufacturer of the instrument required additional correction on the vertical distribution of ^{137}Cs in the soil. The correction procedure was developed; in 2020–2021, it has been successfully tested in 114 kitchengarden plots located at the settlements in the zones of radioactive contamination in the Bryansk region.

Key words: *in situ, gamma-spectrometry, soil, ^{137}Cs , inventory, verification, correction.*

Опыт применения портативного гамма-спектрометра MKS AT6101D для измерения *in situ* плотности загрязнения почвы цезием-137 в Брянской области России

В.П. Рамзаев, 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

*Нами была проверена применимость серийно выпускаемого полевого переносного спектрометра-дозиметра MKS AT6101D (производитель ATOMTEX, Беларусь) для измерения *in situ* плотности загрязнения почвы ^{137}Cs . Исследования проводили в 2015–2020 гг. на территории Брянской области России, загрязненной в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Измерения *in situ* были выполнены на 17 участках (7 лугов и 10 огородов), для которых значения плотности загрязнения ^{137}Cs и средняя глубина миграции радионуклида в почве были известны из лабораторных (ex situ) измерений проб почвы. Выяснилось, что натурные данные, полученные по методике, предоставленной производителем прибора, в ряде случаев требуют дополнительной поправки на вертикальное распределение ^{137}Cs в почве. Метод коррекции был разработан и в 2020–2021 гг. успешно апробирован на 114 приусадебных огородных участках, расположенных в населенных пунктах зоны радиоактивного загрязнения Брянской области.*

Ключевые слова: *in situ, гамма-спектрометрия, почва, плотность загрязнения, ^{137}Cs , верификация, коррекция.*

Valery P. Ramzaev

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

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

Рамзаев Валерий Павлович

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

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

Introduction

Field (*in situ*) gamma spectrometry is a common method for determining the density of soil contamination (Bq/m^2) by technogenic gamma-emitting radionuclides [1–3]. The method can be used in practice as an element of the operational assessment of the radiation environment. In particular, it is applicable for a fast mapping of the contaminant distribution over vast territories [4–7]. Unlike the *ex situ* method, which includes collection of soil samples and their gamma spectrometric analysis in the laboratory [8], the *in situ* method allows obtaining data on the density of soil contamination by a radionuclide (or the radionuclide inventory) in the upper 20–30 cm soil layer directly in the field.

Significant disadvantages of the *in situ* method are difficulties with its metrological certification and the absence of generally recognized reference radioactive sources comparable with the IAEA certified reference radioactive materials that are intended for comparative *ex situ* measurements [9, 10]. In this regard, individual researchers or research groups use various land plots to verify measurement methods and/or conduct comparisons *in situ*. For such plots, the content and/or distribution of radionuclides in the soil are known from results of *ex situ* measurements [6, 11–14].

One of the commercially available serial devices with a built-in option for measuring the ^{137}Cs soil contamination density (A_{Cs}) *in situ* is the field portable gamma spectrometer-dosimeter MKS AT6101D (ATOMTEX, Belarus). The measurement range is 4–3700 kBq/m^2 . Results of measurement (including a value of the statistical uncertainty) can be seen on the display of the control unit immediately after the measurement is completed. The basic function for A_{Cs} measurement is also available in the modern modification of the MKS AT6101DR instrument (<https://www.atomtex.com>). Note that the A_{Cs} quantity is still not related to the metrologically certified characteristics of this class of measuring instruments [15] and, accordingly, the A_{Cs} measurement results need to be verified and, if necessary, corrected.

The aim of this study was to verify results of measurements of the A_{Cs} value obtained using the MKS AT6101D device *in situ* ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$) under conditions of radioactive contamination after the Chernobyl accident. Since devices of the MKS AT6101 series are quite widely used by different research groups [16–21], we expect that results of the verification of one of the built-in basic characteristics of the instrument will be useful not only to us, but also to other researchers.

Materials and methods

The main series of $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ measurements was performed in 17 open land plots (7 meadows and 10 kitchen gardens) in the period 2015–2020 during complex expedition surveys [14, 22] of the zones of the Chernobyl radioactive contamination of the Bryansk region of Russia. As part of these surveys, a field gamma spectrum was measured at each site, and the peak area count rate for the 662 keV photons (PAR_{662} , pps) from ^{137}Cs – $^{137\text{m}}\text{Ba}$ was determined [14, 22]. In addition, soil samples (layer by layer) were collected in each of these plots, and the density of soil contamination with ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-ex situ}}$, kBq/m^2) and the average depth of ^{137}Cs migration in the soil (Z , g/cm^2) were obtained with *ex situ* analyses [14, 22].

The Z value was calculated using the formula:

Введение

Полевая (*in situ*) гамма-спектрометрия является достаточно распространенным методом определения плотности загрязнения почвы ($\text{Бк}/\text{м}^2$) техногенными гамма-излучающими радионуклидами [1–3]. Этот метод может быть использован на практике как элемент оперативной оценки радиационной обстановки. В частности, он применим для быстрого построения карт распределения загрязнения на обширных территориях [4–7]. В отличие от метода *ex situ*, включающего отбор проб почвы и их гамма-спектрометрический анализ в лаборатории [8], метод *in situ* позволяет получать данные о плотности загрязнения почвы радионуклидом (или запасе радионуклида) в верхнем 20–30-сантиметровом слое непосредственно на месте по окончании измерения. Существенными недостатками метода *in situ* являются затруднения с его метрологической аттестацией и отсутствие общепризнанных референтных радиоактивных источников, сравнимых с сертифицированными референтными радиоактивными материалами МАГАТЭ, которые предназначены для сравнительных измерений *ex situ* [9, 10]. В этой связи отдельные исследователи или исследовательские группы используют для верификации методов измерений и/или проведения сличений *in situ* различные земляные участки, для которых по результатам измерений *ex situ* известны содержание и/или распределение радионуклидов в почве [6, 11–14].

Одним из коммерчески доступных серийных приборов, имеющих встроенную опцию измерения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs}) *in situ*, является портативный гамма-спектрометр дозиметр МКС АТ6101Д фирмы АТОМТЕХ (Беларусь). Диапазон измерений составляет 4–3700 $\text{кБк}/\text{м}^2$. Результаты (включая величину статистической неопределенности) могут быть выведены на дисплей блока управления непосредственно по окончании измерения. Базовая функция измерения A_{Cs} имеется и в современной модификации прибора МКС АТ6101ДР (<https://www.atomtex.com>). Отметим, что величина A_{Cs} до сих пор не относится к метрологически аттестованным характеристикам данного класса измерительных приборов [15], и соответственно, результаты измерений A_{Cs} нуждаются в верификации и, при необходимости, в коррекции.

Цель исследования – верификация результатов измерений величины A_{Cs} , полученной с помощью МКС АТ6101Д ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$) в условиях радиоактивно загрязнения после Чернобыльской аварии. Так как приборы серии МКС АТ6101Д достаточно широко используют разные исследовательские группы [16–21], мы рассчитываем на то, что результаты этой верификации одной из встроенных базовых характеристик прибора будут полезны не только нам, но и другим исследователям.

Материалы и методы

Основная серия верификационных измерений $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ была проведена на 17 открытых земляных участках (7 целинных лугов и 10 культивируемых огородов) в период 2015–2020 гг. во время комплексных экспедиционных обследований [14, 22] зон чернобыльского загрязнения территории Брянской области России. В рамках этих обследований на всех участках были измерены полевые гамма-спектры и определена скорость счета в пике полного поглощения первичных фотонов с энергией 662 кэВ

$$Z = Z_1 \times q_1 + Z_2 \times q_2 + \dots + Z_n \times q_n, \quad (1)$$

where Z_i (g/cm²) is the centre of the i -th layer in the soil profile and q_i is the portion (dimensionless) of $A_{Cs-ex\ situ}$ in the i -th layer.

An additional series of verification measurements of $A_{Cs-ATOMTEX}$ was performed at the territory of 46 settlements in the Bryansk region in 2020–2021. Totally, 114 private plots of arable land (kitchengardens) were surveyed in the settlements. The officially established average value of A_{Cs} (A_{Cs-off}) was known for each settlement. It ranged from 27 to 630 kBq/m² in the period of the survey [23]. For 92 of the 114 plots, the plot specific values of A_{Cs} (A_{Cs-BUF} kBq/m²) were determined [23] using another *in situ* method (BUF-method) that had been validated earlier [14, 24].

To perform the $A_{Cs-ATOMTEX}$ measurements, the detector of the MKS AT6101D instrument was placed on an aluminum tripod. The distance between the NaI(Tl) crystal and the soil surface was 1 m. The duration of a measurement was sufficient to ensure that the statistical uncertainty in the determination of $A_{Cs-ATOMTEX}$ did not exceed 5% (95% probability).

Statistical processing of the results was performed using EXCEL for Windows and an on-line free access platform (<https://www.socscistatistics.com>).

Results and discussion

A summary of data on the ¹³⁷Cs inventories determined *in situ* ($A_{Cs-ATOMTEX}$) and *ex situ* ($A_{Cs-ex\ situ}$) and the ratio of $A_{Cs-ATOMTEX}$ to $A_{Cs-ex\ situ}$ for the 17 land plots are provided in Table 1; it also contains results of calculations of Z and PAR_{662} .

The values of $A_{Cs-ex\ situ}$ varied from 69 to 1300 kBq/m², accordingly to [14, 22]. All values fall into the range of 4–3700 kBq/m², in which reliable results on the A_{Cs} determination *in situ* can be obtained accordingly to the ATOMTEX specification (<https://www.atomtex.com>).

The correlation between $A_{Cs-ex\ situ}$ and $A_{Cs-ATOMTEX}$ values was positive, strong and highly statistically significant (Spearman's coefficient, $R_{sp} = 0.970$, $P < 0.001$). Figure 1 illustrates the relationship. However, the absolute $A_{Cs-ATOMTEX}$ values were on av-

от ¹³⁷Cs–^{137m}Ba (PAR_{662} , имп/с) [14, 22]. Кроме того, на этих участках до глубины 20 см были послойно отобраны пробы почвы и по результатам лабораторных исследований получены данные о плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs ($A_{Cs-ex\ situ}$, kBк/м²) и средней глубине миграции ¹³⁷Cs в почве (Z , г/см²) [14, 22].

Величину Z вычисляли по формуле:

$$Z = Z_1 \times q_1 + Z_2 \times q_2 + \dots + Z_n \times q_n, \quad (1)$$

где Z_i (г/см²) – глубина центра i -го слоя в профиле почвы; q_i – доля (безразмерная величина) $A_{Cs-ex\ situ}$ в i -м слое.

Дополнительная серия верификационных измерений $A_{Cs-ATOMTEX}$ была проведена на 114 приусадебных огородных участках, расположенных в 46 населенных пунктах (НП) зоны радиоактивного загрязнения Брянской области. Для каждого НП было известно официально установленное среднее значение плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs-off}). В период обследования оно находилось в диапазоне от 27 до 630 kBк/м² [23]. Для 92 из 114 площадок индивидуальное значение A_{Cs} (A_{Cs-BUF} kBк/м²) было определено *in situ* [23] с использованием другого метода (BUF-метод), который был валидирован ранее [14, 24].

Для проведения измерений $A_{Cs-ATOMTEX}$ детектор прибора MKS AT6101D размещали кристаллом NaI(Tl) вниз на алюминиевом треножнике на высоте 1 м над поверхностью почвы. Продолжительность измерений была достаточна для того, чтобы статистическая неопределенность измерения $A_{Cs-ATOMTEX}$ не превышала 5% (95% вероятности).

Статистическую обработку результатов проводили с помощью EXCEL for Windows и on-line платформы свободного доступа (<https://www.socscistatistics.com>).

Результаты и обсуждение

Сводка данных по плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs, определенной *in situ* ($A_{Cs-ATOMTEX}$) и *ex situ* ($A_{Cs-ex\ situ}$), а также отношение $A_{Cs-ex\ situ}$ к $A_{Cs-ATOMTEX}$ представлены в таблице 1. Результаты расчетов Z и измерений PAR_{662} также даны в таблице 1.

По данным [14, 22], значения $A_{Cs-ex\ situ}$ варьировали от

Table 1

Summary statistics on the inventory of ¹³⁷Cs in soil (A_{Cs}) determined *in situ* with the ATOMTEX method ($A_{Cs-ATOMTEX}$) and *ex situ* with soil samples ($A_{Cs-ex\ situ}$), ratio of $A_{Cs-in\ situ}$ to $A_{Cs-ex\ situ}$, the mean migration depth of ¹³⁷Cs in soil determined *ex situ* (Z), and the count rate in the 662 keV peak (PAR_{662}) for the 17 open land plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2020

[Таблица 1

Сводная статистика по плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs}), определенной *in situ* методом ATOMTEX ($A_{Cs-ATOMTEX}$) и *ex situ* по пробам почвы ($A_{Cs-ex\ situ}$), соотношение $A_{Cs-in\ situ}$ и $A_{Cs-ex\ situ}$, средняя глубина миграции ¹³⁷Cs в почве, определенная *ex situ* (Z), и скорость счета импульсов в пике 662 кэВ (PAR_{662}) для 17 открытых земельных участков, обследованных в Брянской области в 2015–2020 гг.]

Parameter [Параметр]	A_{Cs} (kBq/m ² [kBк/м ²])		$A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-ex\ situ}$	Z (g/cm ² [г/см ²])*	PAR_{662} (pps [имп/с])*
	ATOMTEX	<i>ex situ</i> *			
Minimum [Минимум]	23	69	0.28	2.2	14
Maximum [Максимум]	1400	1300	1.19	15.6	800
Median [Медиана]	185	546	0.35	14.4	95
Mean [Средняя]	390	541	0.58	10.5	216
S.d. [с.о.]	401	381	0.34	5.6	228
CV, % [KB, %]	103	70	59	53	105

* – according to [14, 22]. [* – по данным [14, 22].]

SD – standard deviation [C.o. – стандартное отклонение]; CV – coefficient of variation (%) [KB – коэффициент вариации (%)].

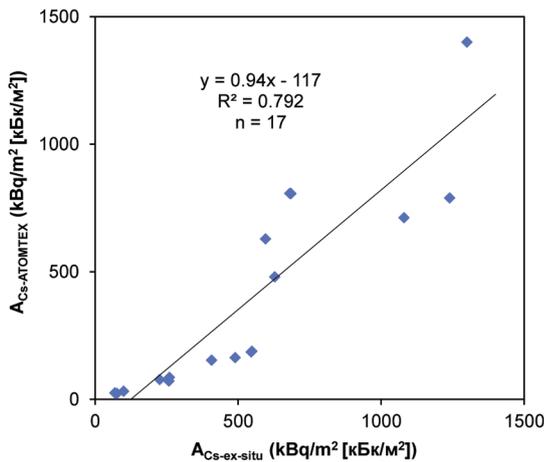


Fig. 1. The comparison between the inventory of ^{137}Cs in soil measured *in situ* with the ATOMTEX method ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$) and the inventory of ^{137}Cs in soil derived *ex situ* using soil samples ($A_{\text{Cs-ex situ}}$) for open ground plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2020

[Рис. 1. Сравнение плотности загрязнения почвы ^{137}Cs , измеренной *in situ* методом ATOMTEX ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$), и плотности загрязнения почвы ^{137}Cs , определенной *ex situ* с использованием образцов почвы ($A_{\text{Cs-ex situ}}$) для открытых земельных участков, обследованных в Брянской области в 2015–2020 гг.]

erage lower by a factor of 1.7 (range 0.84–3.6) compared to the $A_{\text{Cs-ex situ}}$ values.

To find the reason for the discrepancy between the absolute results of the *in situ* and *ex situ* measurements at the 17 surveyed sites, we decided to study the relationship between: 1) the $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ ratio and Z ; 2) $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ and PAR_{662} .

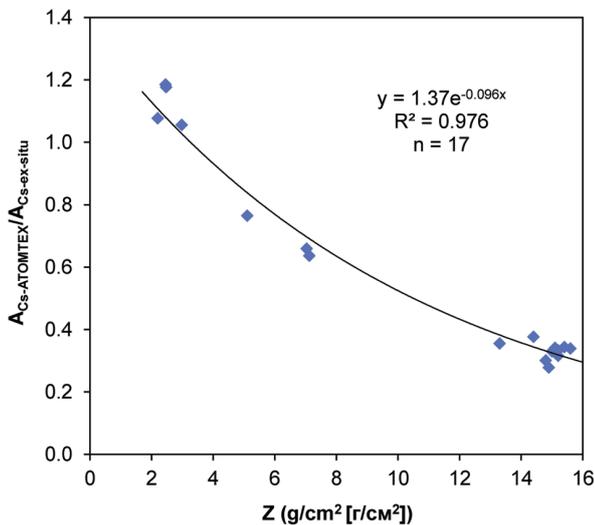


Fig. 2. The relationship between the mean migration depth of ^{137}Cs in soil (Z) and the ratio of inventory of ^{137}Cs in soil determined *ex situ* using soil samples ($A_{\text{Cs-ex situ}}$) [14, 22] to inventory of ^{137}Cs in soil determined *in situ* with the ATOMTEX method ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$) for ground plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2020

[Рис. 2. Соотношение между средней глубиной миграции ^{137}Cs в почве (Z) и отношением запаса ^{137}Cs в почве, определенного *ex situ* с использованием образцов почвы ($A_{\text{Cs-ex situ}}$) [14, 22], к запасу ^{137}Cs в почве, определенному *in situ* с помощью метода ATOMTEX ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$) для земельных участков, обследованных в Брянской области в 2015–2020 гг.]

69 до 1300 кБк/м². Все значения попадают в диапазон 4–3700 кБк/м², в котором могут быть получены надежные результаты по определению A_{Cs} *in situ* в соответствии со спецификацией ATOMTEX (<https://www.atomtex.com>).

Корреляция между значениями A_{Cs} *ex situ* и *in situ* была положительной, сильной и высоко статистически значимой (коэффициент Спирмена, $R_{\text{Sp}} = 0,970$, $P < 0,001$). Рисунок 1 (левая панель) иллюстрирует эту связь. Вместе с тем, абсолютные значения $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ были в среднем в 1,7 раза ниже (диапазон 0,84–3,6), чем значения $A_{\text{Cs-ex situ}}$.

Чтобы найти причину расхождения между абсолютными результатами измерений A_{Cs} *in situ* и *ex situ* на 17 обследованных площадках, мы решили изучить взаимосвязь между: 1) соотношением $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и Z ; 2) $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и PAR_{662} . Между отношением $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и Z была обнаружена положительная и сильная корреляция ($R_{\text{Sp}} = 0,817$, $P < 0,001$). Рисунок 2 иллюстрирует взаимосвязь между двумя переменными. Это соотношение может быть хорошо аппроксимировано экспоненциальной функцией (коэффициент детерминации $R^2 = 0,876$). Линия аппроксимации показывает, что соотношение около 1:1 между $A_{\text{Cs-ex situ}}$ и $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ соответствует диапазону 3–4 г/см² для величины Z . При значениях Z менее 3 г/см² метод ATOMTEX завышает истинную плотность загрязнения ^{137}Cs , а при значениях Z выше 4 г/см² наблюдается занижение A_{Cs} . Была выявлена положительная и высоко статистически значимая корреляция между $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и PAR_{662} ($R_{\text{Sp}} = 0,995$, $P < 0,001$). Эта почти идеальная линейная зависимость между двумя переменными проиллюстрирована на рисунке 3.

Проведенный анализ показывает, что значение A_{Cs} , определенное методом ATOMTEX, прямо пропорционально связано со скоростью счета в пике 662 кэВ, которая является приборным отражением плотности потока фотонов с энергией 662 кэВ в воздухе в месте измерения. Очевидно, что метод ATOMTEX не учитывает весьма выраженную изменчивость глубины миграции ^{137}Cs в почве. Опция, предложенная производителем прибора МКС АТ6101Д, может быть напрямую применена для предварительной оценки A_{Cs} только при средней глубине миграции ^{137}Cs (Z), находящейся в диапазоне 3–4 г/см². Такое сравнительно небольшое заглубление источника излучения в почве в настоящее время можно встретить в некоторых случаях в лесах и на целинных лугах [22, 24]. В то же время наши расчеты показывают, что отношение $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ хорошо коррелирует со средней глубиной миграции ^{137}Cs в почве. Это позволяет нам предложить процедуру коррекции значения $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ для более точной оценки фактического значения A_{Cs} .

Для получения скорректированного значения $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ можно использовать соотношение между $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и Z (см. рис. 2):

$$A_{\text{Cs-ATOMTEX-cor}} = A_{\text{Cs-ATOMTEX}} / CF_Z \quad (2)$$

где $A_{\text{Cs-ATOMTEX-cor}}$ – фактический запас ^{137}Cs в верхних 20 см почвы (кБк/м²); $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ – измеренное прибором МКС АТ6101Д значение A_{Cs} (кБк/м²); CF_Z – эмпирический поправочный коэффициент (безразмерный).

Поправочный коэффициент CF_Z рассчитывается по эмпирической формуле (см. рис. 2):

$$CF_Z = K \times e^{-D \times Z} \quad (3)$$

A positive and strong correlation ($R_{Sp} = 0.817$, $P < 0.001$) was found between the $A_{Cs-ex\ situ}/A_{Cs-ATOMTEX}$ ratio and Z . Figure 2 illustrates the comparison between two variables. This relationship can be well approximated by an exponential function (coefficient of determination $R^2 = 0.876$). The approximation line indicates that the 1:1 ratio between $A_{Cs-ex\ situ}$ and $A_{Cs-ATOMTEX}$ is in the range of 3–4 g/cm² for Z value. At the Z values lower than 3 g/cm², the ATOMTEX method overestimates the true ¹³⁷Cs inventory, while at the Z values higher than 4 g/cm², an underestimation of A_{Cs} is observed. A positive and highly statistically significant correlation was determined between $A_{Cs-ATOMTEX}$ and PAR_{662} ($R_{Sp} = 0.995$, $P < 0.001$). The nearly linear relationship between two variables is illustrated in Figure 3.

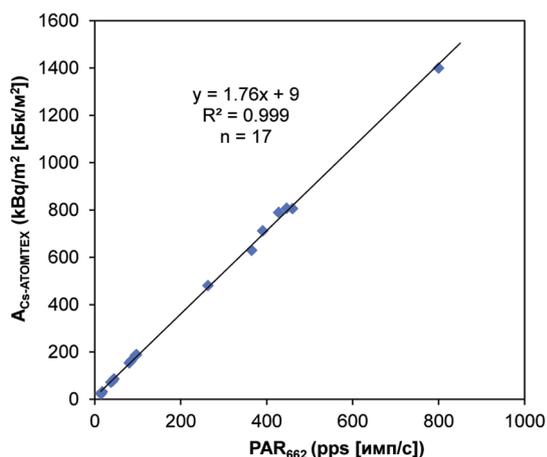


Fig. 3. The relationship between count rate in the 662 keV peak (PAR_{662}) [14, 22] and inventory of ¹³⁷Cs in soil determined *in situ* with the ATOMTEX method ($A_{Cs-ATOMTEX}$) for the ground plots that were surveyed in the Bryansk region in 2015–2020

Рис. 3. Взаимосвязь между скоростью счета в пике 662 кэВ (PAR_{662}) [14, 22] и запасом ¹³⁷Cs в почве, определенным *in situ* методом ATOMTEX ($A_{Cs-ATOMTEX}$) для земельных участков, которые были обследованы в Брянской области в 2015–2020 гг.]

The performed analysis shows that the A_{Cs} value determined *in situ* with the ATOMTEX method is directly proportional to the count rate in the 662 keV peak that is the device reflection of the 662 keV photon fluence rate in the air at the place of measurement. The ATOMTEX method does not consider the migration depth of ¹³⁷Cs in the soil. The option provided by the manufacturer of the MKS AT6101D device can be applied for a preliminary estimation of A_{Cs} only when the mean migration depth of ¹³⁷Cs (Z) is in the range of 3–4 g/cm². Such a relatively shallow bedding of the radiation source in the soil can currently be found only in forests and virgin meadows [22, 24]. At the same time, our calculations show, that the $A_{Cs-ex\ situ}/A_{Cs-ATOMTEX}$ ratio correlates well with the mean migration depth of ¹³⁷Cs in the soil (Z value). It allows us to propose a correction procedure to more accurately estimate the actual A_{Cs} value.

To obtain corrected value of $A_{Cs-ATOMTEX}$, the relationship between $A_{Cs-ex\ situ}/A_{Cs-ATOMTEX}$ ratio and Z (Fig. 2) can be employed:

$$A_{Cs-ATOMTEX-cor} = A_{Cs-ATOMTEX} / CF_Z, \quad (2)$$

where $A_{Cs-ATOMTEX-cor}$ is the actual inventory of ¹³⁷Cs in the top 20 cm of soil (kBq/m²); $A_{Cs-ATOMTEX}$ is the MKS AT6101D measured value of A_{Cs} (kBq/m²); CF_Z is the empirical correction factor (dimensionless).

где K — эмпирический коэффициент (безразмерный); Z — средняя глубина миграции ¹³⁷Cs в почве (г/см²); D — эмпирический коэффициент (см²/г).

Эмпирически выведенные значения K и D составляют 1,37 и 0,096 см²/г соответственно. Отметим, что эти численные величины справедливы для значений Z , находящихся в диапазоне 2–16 г/см².

Предлагаемая процедура коррекции требует определенных знаний о вертикальном распределении ¹³⁷Cs в почве. Теоретически определение вертикального распределения радионуклида, выполненное по небольшому количеству репрезентативных проб почвы на конкретном участке (или в локации), может быть основой для последующего детального измерения и коррекции $A_{Cs-ATOMTEX}$ на всей территории. При этом, конечно, следует обоснованно предполагать, что изменчивость вертикального распределения радионуклида в почве на выбранном участке (в локации) невелика.

Огород (приусадебный участок культивируемой земли) является той локацией, где в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС можно обнаружить относительно небольшую вариабельность значения Z . В частности, по результатам обследования 52 приусадебных участков в Брянской области России в 1996–2003 гг. [25] коэффициент вариации величины Z можно принять равным 13% (среднее значение $Z = 15,7$ г/см², стандартное отклонение = 2,1 г/см²). Поэтому на втором этапе верификационных измерений мы решили проверить правильность предложенной процедуры коррекции значений $A_{Cs-ATOMTEX}$ на локации «Огород». Как было указано выше, всего в 46 НП обследовано 114 приусадебных огородных участков. Значения Z , вычисленные на основе данных по вертикальному распределению ¹³⁷Cs в почве на 10 репрезентативных опробованных участков [14], колебалось от 13,2 до 15,7 г/см² (среднее ± стандартное отклонение = 14,9±0,7 г/см², сырая масса почвы). Отсюда среднее значение поправочного коэффициента CF_Z можно рассчитать по формуле (3) следующим образом: $1,37 \times e^{-0,096 \cdot 14,9} = 0,33$.

Результаты измерений $A_{Cs-ATOMTEX}$ на 114 участках в сопоставлении со значениями A_{Cs-off} приведены на рисунке 4 (панель а) и в таблице 2. Как видно из рисунка 4, $A_{Cs-ATOMTEX}$ и A_{Cs-off} хорошо коррелируют друг с другом ($R_{Sp} = 0,890$; $P < 0,001$). Вместе с тем, оказалось, что значения A_{Cs} , измеренные с помощью MKS AT6101D, в среднем были в 3 раза ниже официально установленных значений плотности загрязнения ¹³⁷Cs почвы территории НП. После применения корректирующего коэффициента ($CF_Z = 0,33$), который был выведен выше, среднее соотношение $A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-off}$ приблизилось к 1 (см. рис. 4 (панель б) и табл. 2). Весьма заметные отклонения (до 3 раз) скорректированных значений $A_{Cs-ATOMTEX}$ на отдельных участках от среднего значения A_{Cs-off} установленного для НП, в известной мере объясняются неравномерностью изначальных выпадений ¹³⁷Cs по площади НП. По данным М.Ю. Орлова и др. [26], разброс значений A_{Cs} между отдельными площадками отбора проб почвы в пределах одного и того же НП может достигать 10 и более раз. В этой связи представляет интерес проанализировать результаты индивидуального обследования 92 огородных участков, где измерения A_{Cs} были проведены одновременно с использованием метода ATOMTEX и BUF-метода (рис. 5,

The correction factor, CF_z , is calculated using the empirical formula (Fig. 2):

$$CF_z = K \times e^{-D \times Z}, \quad (3)$$

where K is the empirical coefficient (dimensionless); Z is the mean migration depth of ^{137}Cs in soil (g/cm^2); D is the empirical coefficient (cm^2/g).

The empirically derived values for K and D are 1.37 and 0.096 cm^2/g , respectively. Note that these numerical values are valid for Z values in the range of 2–16 g/cm^2 .

The proposed correction procedure requires certain knowledge about vertical distribution of ^{137}Cs in the soil. Theoretically, determining the vertical distribution of the radionuclide from a limited number of representative soil samples in a particular area (location) of the radiological survey may be the basis for subsequent detailed measurement and correction of $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ throughout the whole area. In this case, of course, it should be reasonably assumed that a variability of the vertical distribution of the radionuclide in the soil profile in the selected area is small.

Kitchengarden (a private plot of arable land) is the location where one can find a relatively narrow variability between individual plots with respect of Z in the remote period after the Chernobyl accident. Specifically, according to the results of a survey of 52 kitchengarden plots in the Bryansk region of Russia in 1996–2003 [25], a coefficient of variation of Z can be calculated as 13% (mean = 15.7 g/cm^2 , standard deviation = 2.1 g/cm^2). Therefore, at the second stage of the verification measurements, we decided to check the validity of the proposed correction procedure for $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ values at the location “kitchengarden”.

As mentioned above, a total of 114 kitchengarden plots were surveyed in 46 settlements. The Z values, that were calculated from data on the vertical distribution of ^{137}Cs in soil for 10 representative sampled sites [14], ranged from 13.2 to 15.7 g/cm^2 (mean \pm standard deviation = 14.9 \pm 0.7 g/cm^2 , wet weight of soil). From here, the average value of the correction factor, CF_z , can be calculated using formula (3) as follows: $1.37 \times e^{-0.096 \times 14.9} = 0.33$.

Results of measurements $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ in the 114 sites, in comparison with the $A_{\text{Cs-off}}$ values, are shown in Figure 4 (panel a) and in Table 2. As can be seen from Figure 4, $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ and $A_{\text{Cs-off}}$ correlate well with each other ($R_{\text{Sp}} = 0.890$; $P < 0.001$). At the same time, it turned out that the A_{Cs} values measured with the MKS AT6101D were, on average, lower by a factor of 3 compared to the officially established values for the density of ^{137}Cs contamination of the soil at the territory of the settlements. After applying the Z correction factor derived above ($CF_z = 0.33$), the average $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}/A_{\text{Cs-off}}$ ratio approached 1:1 (see Fig. 4 (panel b) and Table 2). Quite noticeable deviations (up to a factor of 3) of the corrected $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ values from the average $A_{\text{Cs-off}}$ value in some plots are to a certain extent explained by the unevenness of the initial ^{137}Cs fallout over the area of settlements. According to Orlov et al. [26], more than 10-fold differences between individual soil sampling sites in the A_{Cs} values can be found within the same settlement. In this regard, it is of interest to analyze the results of an individual survey of 92 garden plots, where A_{Cs} measurements were performed simultaneously using the ATOMTEX-method and the BUF-method (Fig. 5, Table 3). The $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ and $A_{\text{Cs-BUF}}$ results were more strongly correlated with

табл. 3). Показатели $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и $A_{\text{Cs-BUF}}$ более сильно коррелировали друг с другом ($R_{\text{Sp}} = 0,938$), по сравнению с парой $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}-A_{\text{Cs-off}}$ ($R_{\text{Sp}} = 0,890$), а коэффициент вариации для отношения $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}/A_{\text{Cs-BUF}}$ (22%) был, напротив, существенно меньше, чем таковой (40%) для пары $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}-A_{\text{Cs-off}}$. Однако в среднем результаты измерений A_{Cs} с использованием метода ATOMTEX оказались сильно заниженными (в 3 раза) по отношению к результатам, полученным с помощью BUF-метода. Применение предложенной процедуры коррекции к $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ весьма показательно исправило ситуацию (см. рис. 5), и среднее соотношение $A_{\text{Cs-ATOMTEX-corr}}/A_{\text{Cs-BUF}}$ приблизилось к единице (см. табл. 3, колонка 6). Заметное отклонение некоторых точек от отношения 1:1 может быть связано с использованием среднего значения Z для получения $A_{\text{Cs-ATOMTEX-corr}}$ на всех 92 участках, в то время как значения $A_{\text{Cs-BUF}}$ были выведены по значениям Z , рассчитанными для каждого отдельно взятого участка [23].

Заключение

Проведенное сравнительное исследование выявило существенные ограничения в применении предлагаемой разработчиком прибора MKS AT6101D опции определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs}) *in situ*. Получение корректных значений A_{Cs} с использованием этой опции возможно только в том случае, если средняя глубина миграции радионуклида в почве (Z) составляет около 3–4 $\text{г}/\text{см}^2$. Такое сравнительно небольшое заглубление источника излучения в почве в настоящее время можно встретить в некоторых случаях в лесах и на целинных лугах. На культивируемых землях при значительном заглублении радионуклида и нарастании значения Z прибор дает заниженные (до 3,5 раз) показатели A_{Cs} . Для коррекции значения A_{Cs} , полученного с помощью прибора MKS AT6101D, предложена процедура, которая основана на использовании величины Z . Данная процедура успешно опробована на огородных участках, расположенных в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС. Тем не менее, в настоящее время (без метрологической аттестации) использование опции определения A_{Cs} с помощью прибора MKS AT6101D можно рекомендовать только для предварительной оперативной оценки радиоактивного загрязнения территории.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Рамзаев В.П. – концептуализация, измерения, написание черновика рукописи.

Барковский А.Н. – концептуализация, редактирование рукописи.

Благодарности

Авторы благодарят младшего научного сотрудника К.В. Варфоломееву и научного сотрудника А.А. Братилкову (ФБУН НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева) за помощь при проведении полевых измерений.

Информация о конфликте интересов

У авторов нет конфликтов интересов, которые следует раскрывать.

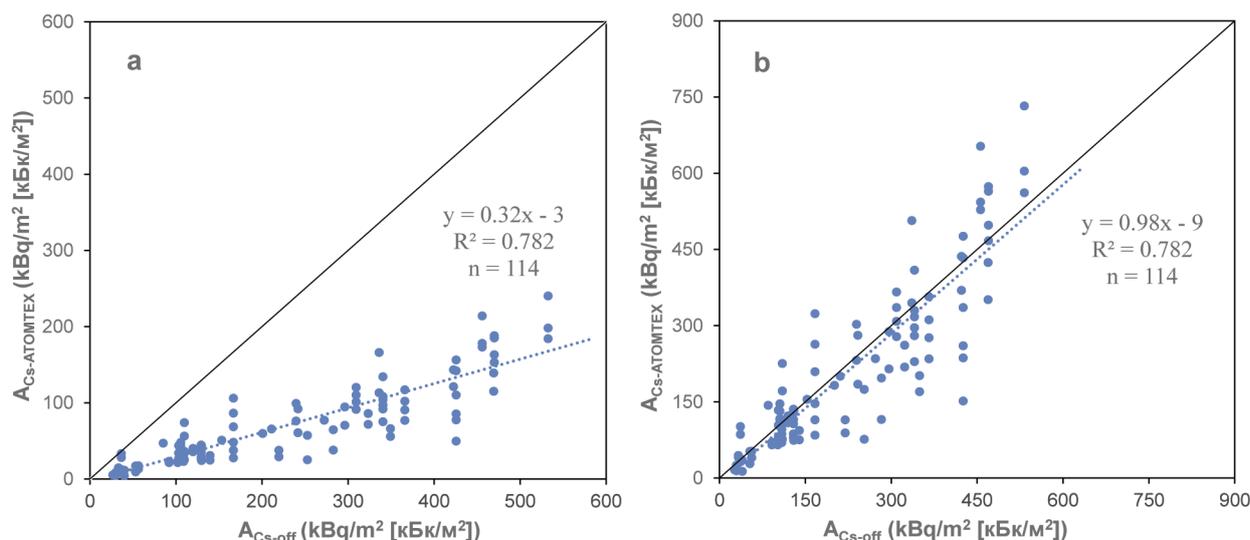


Fig. 4. The comparison between the officially established average value of A_{Cs} for a settlement (A_{Cs-off}) [23] and the A_{Cs} value measured *in situ* at kitchengardens with the MKS AT6101D device using the option provided by the device manufacturer ($A_{Cs-ATOMTEX}$); panel “a” demonstrates the measured values of $A_{Cs-ATOMTEX}$ and panel “b” demonstrates the $A_{Cs-ATOMTEX}$ values corrected for the average mean migration depth of ^{137}Cs in soil ($Z = 14.9$ g/cm²). 114 plots in 46 settlements of the Bryansk region in 2020–2021. The data are provided on the day of *in situ* measurement

[Рис. 4. Сравнение официально установленного среднего значения A_{Cs} для населенного пункта (A_{Cs-off}) [23] и значения A_{Cs} , измеренного *in situ* на огородах прибором MKS AT6101D с использованием опции производителя прибора ($A_{Cs-ATOMTEX}$); панель «а» демонстрирует измеренные значения $A_{Cs-ATOMTEX}$, а панель «б» демонстрирует значения $A_{Cs-ATOMTEX}$, скорректированные на среднюю глубину миграции ^{137}Cs в почве ($Z = 14,9$ г/см²). 114 участков в 46 населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг. Данные представлены на день измерения]

Table 2

Summary statistics on inventory of ^{137}Cs in soil (A_{Cs}) officially established for a settlement (A_{Cs-off}) and determined *in situ* with the ATOMTEX method for a kitchengarden: uncorrected values ($A_{Cs-ATOMTEX}$) and the Z-corrected values ($A_{Cs-ATOMTEX-cor}$). The 114 kitchengarden plots surveyed in 46 settlements in the Bryansk region in 2020–2021

[Таблица 2

Сводная статистика по плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs}), официально установленной для населенного пункта (A_{Cs-off}) и определенной *in situ* методом ATOMTEX на огороде: нескорректированные значения ($A_{Cs-ATOMTEX}$) и значения с поправкой на Z ($A_{Cs-ATOMTEX-cor}$). 114 приусадебных участков, обследованных в 46 населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг.]

Parameter [Параметр]	A_{Cs} (kBq/m ² [кБк/м ²])			Ratio [Отношение]	
	$A_{Cs-ATOMTEX}$	$A_{Cs-ATOMTEX-cor}$	A_{Cs-off} *	$A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-off}$	$A_{Cs-ATOMTEX-cor}/A_{Cs-off}$
Minimum [Минимум]	4.3	13	27	0.10	0.30
Maximum [Максимум]	240	732	533	0.90	2.76
Median [Медиана]	50	153	167	0.30	0.91
Mean [Средняя]	70	213	227	0.31	0.95
S.d. [с.о.]	53	162	146	0.12	0.38
CV,% [KB,%]	76	76	64	40	40

* – according to [23]. [* – по данным [23].

SD – standard deviation [C.o. – стандартное отклонение]; CV – coefficient of variation (%) [KB – коэффициент вариации (%)].

each other ($R_{Sp} = 0.938$) compared to the $A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-off}$ pair results ($R_{Sp} = 0.890$). The coefficient of variation for the $A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-BUF}$ ratio (22%) was, on the contrary, significantly less than that (40%) for the $A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-off}$ pair. However, on average, the A_{Cs} values deduced using the ATOMTEX-method turned out to be strongly underestimated (by a factor of 3), compared with the BUF-method values. The application of the proposed correction factor led to a significant improvement of the situation (Fig. 5), and the average $A_{Cs-ATOMTEX-cor}/A_{Cs-BUF}$ ratio approached to approximately 1:1 (Table 3, column 6). The vis-

Сведения об источниках финансирования

Финансирование работы частично осуществлялось по контракту № 0173100001419000019 с Роспотребнадзором.

Литература

1. ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ICRU report: 53. 1994. Bethesda, Maryland, USA.

ible deviation of some points from the 1:1 ratio can be attributed to using the mean value of Z for derivation of $A_{Cs-ATOMTEX-corr}$ at all 92 plots, while the A_{Cs-BUF} values were deduced with the Z value calculated for each individual plot [23].

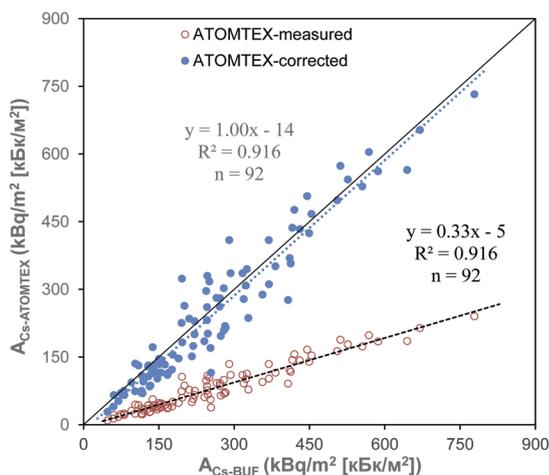


Fig. 5. The comparison between A_{Cs} determined *in situ* using the BUF-method (A_{Cs-BUF}) [23] and the option provided by the device MKS AT6101D manufacturer ($A_{Cs-ATOMTEX}$); the relationship is shown for the originally measured values of $A_{Cs-ATOMTEX}$ (ATOMTEX-measured) and the values corrected for the average mean migration depth of ^{137}Cs in soil, $Z = 14,9 \text{ g/cm}^2$ (ATOMTEX-corrected). 92 plots in the 39 settlements of the Bryansk region in 2020–2021. The data are provided on the day of measurement

Рис. 5. Сравнение A_{Cs} , определенного *in situ* с использованием BUF-метода (A_{Cs-BUF}) [23] и опции, предоставленной производителем прибора MKS AT6101D ($A_{Cs-ATOMTEX}$); зависимость показана для первоначально измеренных значений $A_{Cs-ATOMTEX}$ (ATOMTEX-measured) и значений, скорректированных на среднюю глубину миграции ^{137}Cs в почве, $Z = 14,9 \text{ г/см}^2$ (ATOMTEX-corrected). 92 участка в 39 населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг. Данные представлены на день измерения]

Conclusion

The conducted analysis revealed significant limitations in the use of the option proposed by the manufacturer of the

2. Tyler A.N., Sanderson D.C.W., Scott E.M. Estimating and accounting for ^{137}Cs source burial through *In situ* gamma spectrometry in salt marsh environments // Journal of Environmental Radioactivity. 1996. Vol. 33, No. 3, P. 195–212.
3. Varley A., Tyler A., Dowdall M., et al. An *in situ* method for the high resolution mapping of ^{137}Cs and estimation of vertical depth penetration in a highly contaminated environment // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 605–606. P. 957–966.
4. Chesnokov A.V., Govorun A.P., Fedin, V.N., et al. Method and device to measure ^{137}Cs soil contamination in-situ // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 1999. Vol. 420. P. 336–344.
5. Tyler A. High accuracy *in situ* radiometric mapping // Journal of Environmental Radioactivity. 2004. Vol. 72, No. 1–2. P. 195–202.
6. Mikami S., Sato S., Hoshide Y., et al. *In situ* gamma spectrometry intercomparison in Fukushima, Japan // Japanese Journal of Health Physics. 2015. Vol. 50, No. 3. P. 182–188.
7. Mikami S., Ishikawa D., Matsuda H., et al. Guidance for *in situ* gamma spectrometry intercomparison based on the information obtained through five intercomparisons during the Fukushima mapping project // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 210. P. 105938.
8. Rostron P.D., Heathcote J.A., Ramsey M.H. Comparison between *in situ* and *ex situ* gamma measurements on land areas within a decommissioning nuclear site: a case study at Dounreay // Journal of Radiological Protection. 2014. Vol. 34, No. 3. P. 495–508.
9. IAEA – International Atomic Energy Agency. Certified Reference Materials for Radioactivity Measurements in Environmental Samples of Soil and Water. URL: <https://www.iaea.org/publications/8595/certified-reference-materials-for-radioactivity-measurements-in-environmental-samples-of-soil-and-water>. (Дата обращения: 18.06.2023).
10. IAEA – International Atomic Energy Agency. Certified reference material IAEA-385: natural and artificial radionuclides in sediment from the Irish Sea. URL: https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Shared%20Documents/ReferenceMaterials/Radionuclides/IAEA-385/RS_IAEA-385_V5.3.pdf. (Дата обращения: 18.06.2023).
11. Miller K.M., Shebell P., Monetti M.A., et al. An intercomparison of *in situ* gamma-ray spectrometers // Radioactivity and Radiochemistry. 1998. Vol. 9, No. 4. P. 27–40.
12. Dowdall M., Bondar Yu., Frstrup P., et al. In-situ Gamma Spectrometry Field Activity – Chernobyl (GAMFAC). NKS-

Table 3

Summary statistics on inventory of ^{137}Cs in soil (A_{Cs}) determined *in situ* with the BUF-method (A_{Cs-BUF}) and the ATOMTEX method: uncorrected values ($A_{Cs-ATOMTEX}$) and the Z-corrected values ($A_{Cs-ATOMTEX-corr}$). The 92 kitchen garden plots surveyed in 39 settlements in the Bryansk region in 2020–2021

Таблица 3

Сводная статистика по плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs}), определенной *in situ* на огородах методом BUF (A_{Cs-BUF}) и методом АТОМТЕХ: нескорректированные значения ($A_{Cs-ATOMTEX}$) и значения с поправкой на Z ($A_{Cs-ATOMTEX-corr}$). 92 приусадебных участка, обследованных в 39 населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг.]

Parameter [Параметр]	A_{Cs} (kBq/m ² [кБк/м ²])			Ratio[Отношение]	
	$A_{Cs-ATOMTEX}$	$A_{Cs-ATOMTEX-corr}$	A_{Cs-BUF} *	$A_{Cs-ATOMTEX} / A_{Cs-BUF}$	$A_{Cs-ATOMTEX-corr} / A_{Cs-BUF}$
Minimum [Минимум]	9.2	28	48	0.15	0.45
Maximum [Максимум]	240	732	779	0.54	1.65
Median [Медиана]	67	205	231	0.30	0.93
Mean [Средняя]	80	245	259	0.30	0.92
S.d. [с.о.]	53	160	153	0.07	0.21
CV,% [КВ,%]	66	66	59	22	22

* – according to [23]. [* – по данным [23]].

SD – standard deviation [С.о. – стандартное отклонение]; CV – coefficient of variation (%) [КВ – коэффициент вариации (%)].

MKS AT6101D instrument for determining the density of soil contamination with ^{137}Cs (A_{Cs}) *in situ*. Obtaining actual A_{Cs} values by using this option is possible if the average depth of radionuclide migration in the soil (Z) is about 3–4 g/cm². Such a relatively shallow bedding of the radiation source in the soil can currently be found only in forests and virgin meadows. On cultivated lands, with a significant deepening of the radionuclide and an increase in the Z value, the device MKS AT6101D underestimates (up to the factor of 3.5) the actual A_{Cs} . To correct the A_{Cs} value obtained using the MKS AT6101D instrument, a procedure based on the use of the Z value was proposed. The procedure has been successfully tested in the kitchengarden plots located in the zone of radioactive contamination after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. However, at present (without metrological certification), the use of the A_{Cs} determination option of the MKS AT6101D instrument can only be recommended for a preliminary operational assessment of the radioactive contamination of territory.

Authors' personal contribution

V.P. Ramzaev – conceptualization, measurements, writing draft of the manuscript.

A.N. Barkovsky – conceptualization, editing the manuscript.

Acknowledgements

The authors thank K.V. Varfolomeeva and A.A. Bratilova (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) for help in the filed measurements.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The work was partially financed under contract No. 0173100001419000019 with Rospotrebnadzor.

References

- ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ICRU report: 53. 1994. Bethesda, Maryland, USA.
- Tyler AN, Sanderson DCW, Scott EM. Estimating and accounting for ^{137}Cs source burial through *In situ* gamma spectrometry in salt marsh environments. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1996;33(3): 195–212.
- Varley A, Tyler A, Dowdall M, Bondar Y, Zabrotski V. An *in situ* method for the high resolution mapping of ^{137}Cs and estimation of vertical depth penetration in a highly contaminated environment. *Science of the Total Environment*. 2017;605–606: 957–966.
- Chesnokov AV, Govorun AP, Fedin VN, Ivanov OP, Liksonov VI, Potapov VN, et al. Method and device to measure ^{137}Cs soil contamination *in-situ*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1999;420: 336–344.
- Tyler A. High accuracy *in situ* radiometric mapping. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;72(1–2): 195–202.
- Mikami S, Sato S, Hoshide Y, Sakamoto R, Okuda N, Saito K. *In situ* gamma spectrometry intercomparison in Fukushima, Japan. *Japanese Journal of Health Physics*. 2015;50(3): 182–188.
- Mikami S, Ishikawa D, Matsuda H, Hoshide Y, Okuda N, Sakamoto R, et al. Guidance for *in situ* gamma spectrometry intercomparison based on the information obtained through five intercomparisons during the Fukushima mapping project. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;210: 105938.
- Electronic report. NKS Secretariat, Roskilde, Denmark. November, 2015.
- Kroupa T., Setnička M., Čtvrtečková A., Marek R. Reference surface for *in situ* gamma spectrometry // *Radiation Protection Dosimetry*. 2019. Vol. 186, No. 2–3. P. 263–267.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра MKS AT6101D *in situ* // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 2. С. 56–65.
- Спектрометры MKS-AT6101. Приложение к свидетельству № 56473 об утверждении типа средств измерений. URL: <https://www.ntcexpert.ru/documents/docs/opisanie-tipa.pdf>. (Дата обращения: 07.07.2023).
- Жуковский А.И., Кутень С.А., Хрущинский А.А., и др. Оценка области влияния загрязненного участка почвы при решении задач радиационного мониторинга методом «*in situ*» // *Приборы и методы измерений*. 2014. № 1. С. 119–125.
- Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Венков В.А., и др. Опыт реабилитации объектов, загрязненных радионуклидами, на примере участка территории завода «Мосрентген» // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 3. С. 107–114.
- Екидин А.А., Васильев А.В., Васянович М.Е., и др. Полевые методы исследования радиационной обстановки в районе размещения Белорусской АЭС в предэксплуатационный период // *АНРИ*. 2020. № 2. С. 31–44.
- Yarmoshenko I., Vasilyev A., Ekinin A., et al. Non-destructive measurements of natural radionuclides in building materials for radon entry rate assessment // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 328, No. 2. P. 727–737.
- Собакин П.И., Чевычелов А.П., Горохов А.Н. Радиогеохимия почв и песков территории моноценовой россыпи в Южной Якутии // *Почвоведение*. 2021. № 12. С. 1549–1563.
- Räaf C., Jönsson M., Bernhardsson C. Revisiting external dose rate and ground deposition of Chernobyl fallout in the Gävle region in Sweden: Comparison between estimates from soil sampling vs assessments using a field portable (NaI(Tl)) gamma spectrometer. In: XIX conference of the Nordic Society for Radiation Protection, held at Malmö Live, Malmö, Sweden, June 5–9, 2023. URL: https://nsfs.org/wp-content/uploads/2023/05/NSFS-XIX-Programme_Final_2023.pdf. (Дата обращения: 11.07.2023).
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Корреляция между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесах, загрязненных ^{137}Cs : отдаленный период после Чернобыльской аварии // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 4. С. 37–46.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность AMBIENTного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг. // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 4. С. 85–95.
- Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 231. P. 106562.
- Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85. P. 205–227.
- Орлов М.Ю., Сныков В.П., Бочков Л.П. Определение средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs // *Атомная энергия*. 1994. Т. 76, № 3. С. 212–217.

Поступила: 18.09.2023 г.

8. Rostron PD, Heathcote JA, Ramsey MH. Comparison between *in situ* and *ex situ* gamma measurements on land areas within a decommissioning nuclear site: a case study at Dounreay. *Journal of Radiological Protection*. 2014;34(3): 495–508.
9. IAEA – International Atomic Energy Agency. Certified Reference Materials for Radioactivity Measurements in Environmental Samples of Soil and Water. Available on: <https://www.iaea.org/publications/8595/certified-reference-materials-for-radioactivity-measurements-in-environmental-samples-of-soil-and-water>. (Accessed 18.06.2023).
10. IAEA – International Atomic Energy Agency. Certified reference material IAEA-385: natural and artificial radionuclides in sediment from the Irish Sea. Available on: https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Shared%20Documents/ReferenceMaterials/Radionuclides/IAEA-385/RS_IAEA-385_V5.3.pdf. (Accessed 18.06.2023).
11. Miller KM, Shebell P, Monetti MA, Klemic G, Venkataraman R, Fisher E, et al. An intercomparison of *in situ* gamma-ray spectrometers. *Radioactivity and Radiochemistry*. 1998;9(4): 27–40.
12. Dowdall M, Bondar Yu, Fristrup P, Guðnason K, Granström M, Hedman A, et al. In-situ Gamma Spectrometry Field Activity – Chernobyl (GAMFAC). NKS-352. Electronic report. NKS Secretariat, Roskilde, Denmark. November, 2015.
13. Kroupa T, Setnička M, Čtvrtečková A, Marek R. Reference surface for *in situ* gamma spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*. 2019;186(2–3): 263–267.
14. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Validation of a method for *in situ* determination of ¹³⁷Cs soil contamination density in kitchen gardens using the portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 56–65. (In Russian).
15. Spectrometers MKS-AT6101. Appendix to certificate No. 56473 on approval of the type of measuring instruments. Available on: <https://www.ntcexpert.ru/documents/docs/opisanie-tipa.pdf>. (In Russian). (Accessed 07.07.2023)
16. Zhukouski A, Kutsen S, Khrtuchinsky A, Tolkachev A, Guzov V, Kojemiakin V, et al. Impact range estimation of polluted soil area for radiation monitoring by «*in situ*» method. *Pribory i metody izmereniy = Devices and Methods of Measurements*. 2014;(1): 119–125. (In Russian).
17. Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Venkov VA, Ivanov SA, Berezhnoy VV. Experience of remediation of sites contaminated with radionuclides on the example of the territory of the Mosrentgen plant. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 107–114. (In Russian).
18. Ekidin A, Vasiliev A, Vasyanovich M, Nazarov E, Pyshkina M, Nichiporchuk A, et al. Field methods for studying the radiation situation in the area of the Belarusian NPP in the pre-operational period. *ANRI*. 2020;(2): 31–44. (In Russian).
19. Yarmoshenko I, Vasilyev A, Ekidin A, Pyshkina M, Malinovsky G, Onishchenko A, et al. Non-destructive measurements of natural radionuclides in building materials for radon entry rate assessment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021;328(2): 727–737.
20. Sobakin PI, Chevychelov AP, Gorokhov AN. Radiogeochemistry of soils and sands of the monazite placer in South Yakutia. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2021;(12): 1549–1563. (In Russian).
21. Rääf C, Jönsson M, Bernhardsson C. Revisiting external dose rate and ground deposition of Chernobyl fallout in the Gävle region in Sweden: Comparison between estimates from soil sampling vs assessments using a field portable (NaI(Tl)) gamma spectrometer. In: XIX conference of the Nordic Society for Radiation Protection, held at Malmö Live, Malmö, Sweden, June 5–9, 2023. Available on: https://nsfs.org/wp-content/uploads/2023/05/NSFS-XIX-Programme_Final_2023.pdf. (Accessed: 11.07.2023).
22. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ¹³⁷Cs: the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 37–46. (In Russian).
23. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ¹³⁷Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 85–95. (In Russian).
24. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M. *In situ* determination of ¹³⁷Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;231: 106562.
25. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.
26. Orlov MY, Snykov VP, Bochkov LP. Determination of average ground ¹³⁷Cs contamination. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 1994;76(3): 212–217. (In Russian).

Received: 18 September, 2023

For correspondence: Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: V.Ramzaev@mail.ru)

Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Centre, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Барковский Анатолий Николаевич – руководитель Федерального радиологического центра, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Experience of using the portable gamma spectrometer MKS AT6101D for *in situ* measurements of the density of ¹³⁷Cs soil contamination in the Bryansk region of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 86-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-86-96

Для цитирования: Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Опыт применения портативного гамма-спектрометра МКС АТ6101Д для измерения *in situ* плотности загрязнения почвы цезием-137 в Брянской области России // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 86-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-86-96

Радиационные аварии в лучевой и радионуклидной диагностике и терапии: сравнение российских и международных подходов к терминологии и классификации

А.В. Водоватов^{1,2}, Л.А. Чипига^{1,3,4}, С.А. Рыжов^{5,6,7}, А.В. Петрякова^{1,8}, А.М. Библин¹, Г.А. Горский^{1,9}

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

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

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

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

⁵ Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Россия

⁶ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Москва, Россия

⁷ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

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

⁹ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

Внедрение новых методов ядерной медицины, лучевой диагностики и терапии с использованием медицинских источников ионизирующего излучения неизбежно приводит к росту числа и видов аварийных (нештатных) ситуаций. В международной практике в последние годы особое внимание уделяется вопросам предотвращения радиационных аварий и происшествий при медицинском облучении. При этом основной акцент сделан на аварийном облучении (переоблучении) пациентов в рентгеновской и радионуклидной диагностике и терапии. Данные подходы в отечественных нормативно-методических документах реализованы ограниченно и формально. Основное внимание уделяется крупномасштабным техногенным радиационным авариям, а аварийные (нештатные) ситуации при медицинском облучении незаслуженно игнорируются. Целью работы являлся анализ терминологии и классификации радиационных аварий и происшествий при медицинском облучении в Российской Федерации и зарубежных странах для разработки предложений по совершенствованию подходов к их классификации в рамках переработки действующих нормативно-методических документов. Результаты работы показали, что необходимо актуализировать отечественные подходы к определению и классификации радиационных аварий в медицине с учетом специфики медицинского облучения. Для этого целесообразно ввести различные уровни аварийных (нештатных) ситуаций, отличающиеся друг от друга масштабами воздействия и последствий для пациентов, персонала и населения. С учетом отсутствия проработанных сценариев аварийных (нештатных) ситуаций в отечественных нормативно-методических документах, такую градацию возможно заимствовать из международных регулирующих документов при условии ее адаптации под специфику и реалии отечественной системы здравоохранения.

Ключевые слова: радиационная авария, радиационное происшествие, медицинское облучение, пациенты, персонал.

Водоватов Александр Валерьевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: vodovatoff@gmail.com

Введение

В международной практике [1–4] в последние годы особое внимание уделяется вопросам предотвращения радиационных аварий (РА) и происшествий при медицинском облучении. При этом основной акцент сделан на аварийном облучении (переоблучении) пациентов в рентгеновской и радионуклидной диагностике и терапии. В международных регулирующих документах [1–4] введено понятие непреднамеренного или аварийного медицинского облучения, являющегося результатом недостатков проектирования и эксплуатационных отказов медицинского радиологического оборудования, отказов и ошибок в программном обеспечении или следствием ошибок человека. К случаям аварийного медицинского облучения относят любые терапевтические и диагностические процедуры, проводимые либо не тому пациенту, либо не для той анатомической области (ткани), либо не тем радиофармацевтическим препаратом, либо с разовой дозой или суммарной дозой, существенно отличающейся от значений, предписанных врачом, или которые могут приводить к необоснованным побочным эффектам, а также любые отказы оборудования, аварии, ошибки или другие необычные ситуации/события, которые могут повлечь облучение пациента, значительно отличающееся от предполагаемого диагностической и терапевтической процедурой. При этом основной акцент делается не на наказание виновных и информирование регулирующих органов, а на разработку программы внутреннего обеспечения качества в медицинской организации, направленной на профилактику возникновения аварийных ситуаций.

В последние годы также все чаще применяется альтернативный подход предотвращения РА и происшествий при медицинском облучении, основанный на оценке доз облучения пациентов, накопленных за определенный период времени, включая дозы, полученные в течение одного обращения в медицинскую организацию, и анализе ситуаций необоснованного (unjustified) облучения пациентов [5, 6].

Данные подходы в отечественных нормативно-методических документах реализованы ограниченно и сугубо формально. Основное внимание уделяется крупномасштабным техногенным РА, а аварийные (нештатные) ситуации при медицинском облучении незаслуженно игнорируются. Спецификой радиационных аварий (происшествий) в медицине является избыточное облучение (или наоборот, недостаточное облучение) преимущественно пациентов, дозы у которых не нормируются. Развитие детерминированных эффектов облучения у пациентов не всегда является индикатором аварийной ситуации. При проведении интервенционных исследований и процедур лучевой терапии детерминированные эффекты являются зачастую неизбежным побочным эффектом от процедуры. Аварийная ситуация в лучевой диагностике или терапии может быть следствием врачебной ошибки и реализоваться без нарушений требований по обеспечению радиационной безопасности пациентов.

Внедрение новых методов ядерной медицины, лучевой диагностики и терапии с использованием медицинских источников ионизирующего излучения (ИИИ) ассоциировано с ростом числа и видов аварийных (не-

штатных) ситуаций. Так, радиационные аварии в медицине с тяжелыми последствиями для здоровья по данным международных обзоров за период 2010–2013 гг. составляют более 80% от всех радиационных аварий (57 аварий из 66 [7]). Для обеспечения достаточного уровня радиационной защиты пациентов, персонала и населения необходимо иметь возможность идентифицировать и выявлять различные виды аварийных (нештатных) ситуаций, а также разработать комплекс мер по их предотвращению, реагированию и снижению тяжести последствий.

Цель исследования – анализ терминологии и классификации радиационных аварий и происшествий при медицинском облучении в Российской Федерации и зарубежных странах для разработки предложений по совершенствованию подходов к их классификации в рамках переработки действующих нормативно-методических документов.

Материалы и методы

Дизайн исследования: систематический обзор научных публикаций в рецензируемых журналах из библиографических баз Pubmed/MEDLINE, Google Scholar, eLIBRARY за период 2010–2023 гг. Дополнительно рассмотрены существующие иностранные и отечественные нормативно-методические и регулирующие документы. Тексты отечественных нормативно-методических документов и нормативно-правовых актов были заимствованы из электронной базы КонсультантПлюс. Тексты международных регулирующих документов были заимствованы с официального сайта МАГАТЭ и порталов правовой информации зарубежных государств.

Поиск публикаций осуществлялся по следующим ключевым словам: радиационные аварии, радиационные аварии в медицине, radiation incidents in radiology, radiation accidents in radiology, unintended medical exposure, accidental medical exposure, radiation events in radiology.

Критериями исключения являлись отсутствие ссылок на действующие нормативно-правовые акты и отсутствие данных о РА и аварийных (нештатных) ситуациях при медицинском облучении. Для последующего анализа отбирались статьи с текстом на русском или английском языках. Перечень публикаций для анализа был сформирован путем исключения дублей, а также статей, для которых был недоступен полный текст статьи. Затем было рассмотрено текстовое содержание отобранных статей, с учетом года публикации, дизайна исследований, цели и результатов, после чего произведено второе исключение. Были исключены публикации, не включавшие в себя данные о номенклатуре РА и аварийных (нештатных) ситуаций при медицинском облучении. В итоговые результаты систематического обзора было включено 44 публикации.

В рамках систематического обзора в отобранных публикациях анализировались следующие аспекты: терминология, используемая в контексте радиационных аварий в медицине; классификация радиационных аварий, происшествий (инцидентов) в лучевой диагностике и терапии.

Результаты и обсуждение

Российская Федерация

В соответствии с Федеральным законом № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения»¹ (3-ФЗ) радиационная авария – «потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей выше установленных норм² или к радиоактивному загрязнению окружающей среды». Дозы облучения пациентов при медицинском облучении не нормируются, что не позволяет в полной мере использовать данное определение для ситуаций медицинского облучения.

В соответствии с Федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии НП-014-16³, к аварии относятся «потеря управления радиационным источником, нарушение пределов и/или условий нормальной эксплуатации радиационного источника, несанкционированный доступ к радиационному источнику, радиоактивным веществам и радиоактивным отходам, утеря и/или хищение радиационного источника, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, ошибка персонала», в результате которых имеет место любое из следующих последствий: прогнозируемые дозы облучения лиц из числа населения превышают основные пределы доз, установленные нормами радиационной безопасности; незапланированное облучение персонала превысило основные пределы доз, установленные нормами радиационной безопасности. Данное определение также не учитывает особенности РА в медицине и не подходит для регулирования медицинского облучения пациентов.

Следует отметить, что в отечественном регулировании радиационной безопасности отнесение события к РА влечет за собой правовые последствия. В соответствии с п.6.8. ОСПОРБ 99/2010⁴, «во всех случаях установления факта радиационной аварии администрация радиационного объекта или территории, на которой произошла авария, обязана проинформировать органы государственной власти, в том числе органы, осуществляющие государственный санитарно-эпидемиологический надзор, а также органы местного самоуправления». В свою очередь, территориальные органы Роспотребнадзора в соответствии с постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. № 11⁵ и приказом Роспотребнадзора от 23.12.2013 № 968⁶ в срок не позднее 12 ч после установления факта чрезвычайной ситуации должны информировать Федеральную службу по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека и направлять внеочередные донесения о возникновении чрезвычайной ситуации. Копии донесений направляются в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева для регистрации в базе радиационных аварий и инцидентов (подсистеме автоматизированной системы контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора). По итогам получения информации о радиационной аварии органы Роспотребнадзора принимают управленческие решения. Данные донесения должны составляться для всех видов радиационных аварий (0–7 уровни в соответствии со шкалой INES [8]). При этом в отношении медицинской организации проводится санитарно-эпидемиологическое расследование или внеплановая проверка, при этом после установления перечня нарушений санитарного законодательства и виновности в выявлен-

¹ Федеральный закон от 09.01.1996 г. № 3-ФЗ (ред. от 19.07.2011 г.) «О радиационной безопасности населения» [Federal State Law N 3-FZ, 09.01.1996 "On the radiation safety of the public" (In Russ.)]

² Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 г. № 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09» (вместе с «НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы») (зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 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.)]

³ Приказ Ростехнадзора от 15.02.2016 г. № 49 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии "Правила расследования и учета нарушений при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационных источников, пунктов хранения радиоактивных веществ и радиоактивных отходов и обращении с радиоактивными веществами и радиоактивными отходами" (вместе с "НП-014-16. Федеральные нормы и правила...")» (зарегистрировано в Минюсте России 04.05.2016 г. № 41970) [Rostekhnadzor Order of 15.02.2016 N 49 "On approval of federal norms and rules in the field of atomic energy use "Rules for investigation and registration of violations during operation and decommissioning of radiation sources, storage facilities for radioactive materials and radioactive waste and management of radioactive materials and radioactive waste" (With "NP-014-16. Federal norms and rules...") (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 04.05.2016 N 41970) (In Russ.)]

⁴ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 г. № 40 (ред. от 16.09.2013 г.) «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 "Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)" (вместе с "СП 2.6.1.2612-10. ОСПОРБ-99/2010. Санитарные правила и нормативы...")» (зарегистрировано в Минюсте России 11.08.2010 г. № 18115) [Sanitary rules and norms SP.2.6.1.2612-10 "Basic sanitary rules of the provision of the radiation safety (OSPORB 99/2010)". (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 11.08.2010 N 41970) (In Russ.)]

⁵ 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.)]

⁶ 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.)]

ных нарушениях должностных лиц последние привлекаются к административной ответственности.

Не менее строгие требования по расследованию радиационных аварий предусмотрены требованиями Ростехнадзора в НП 014-16. Так, оперативное сообщение должно быть передано в течение 1 ч с момента выявления, а предварительное сообщение, подписанное руководителем, не позднее 24 ч с момента выявления. Данные требования вполне оправданы в случаях крупномасштабных радиационных аварий, загрязнении местности или при возникновении острых поражений, требующих безотлагательной медицинской реакции, однако экстраполяция данных подходов к медицинскому облучению выглядит избыточной. Такие, не всегда обоснованные серьезные меры (жесткие сроки информирования о факте радиационной аварии, привлечение к административной ответственности и пр.) приводят к замалчиванию происходящих на объектах событий и отсутствию предотвращающих их мероприятий на местах.

Также в нормативно-методических документах Роспотребнадзора отсутствует какая-либо классификация радиационных аварий по степени воздействия на персонал/население/пациентов (инцидент, происшествие и пр.). Термин «Происшествие» введен в НП-014-16 как радиационная авария, в ходе которой произошла потеря контроля над источником ионизирующего излучения, которая не привела к переоблучению населения и персонала выше основных пределов доз (что также не в полной мере подходит для медицинского облучения, где, как правило, происходит переоблучение пациентов).

Основные нормативно-правовые акты (ФЗ-3, НРБ 99/2009, ОСПОРБ 99/2010) не содержат конкретных примеров или критериев отнесения к РА применительно к медицинскому облучению. В статье 19 ФЗ-3 указано, что перечень потенциальных РА с прогнозом их последствий, а также критерии принятия решений при возникновении радиационных аварий должны быть разработаны в каждой организации, в которой возможно возникновение РА. Данное положение раскрыто в п. 2.5.1 ОСПОРБ 99/2010, в котором ответственность за наличие инструкций по действиям персонала при РА возлагается на администрацию радиационного объекта. Ответственность за предупреждение (предотвращение) РА и выполнение правил поведения в случае возникновения РА возлагается на персонал группы А. Меры безопасности в случае РА должны быть разработаны и обоснованы в проектной

документации радиационного объекта (п. 3.3.1 ОСПОРБ 99/2010). В проектной документации каждого радиационного объекта должны быть определены возможные РА, возникающие вследствие неисправности оборудования, неправильных действий персонала, стихийных бедствий или иных причин, которые могут привести к потере контроля над источниками излучения и облучению людей и (или) радиоактивному загрязнению окружающей среды (п. 6.2. ОСПОРБ 99/2010). Данные требования разработаны применительно к облучению от техногенных источников в аварийных условиях и не учитывают специфику возникновения аварийных (нештатных) ситуаций при медицинском облучении пациентов. В СанПиН 2.6.1.2891-11⁷ указано, что перечень возможных РА и мер по их предупреждению должен быть включен в техническую документацию на медицинские установки с источниками ионизирующего излучения (ИИИ) для диагностических и лечебных целей (п. 3.1.2). Следует отметить, что для описания всех возможных штатных ситуаций безальтернативно используется термин «Авария».

Более детальные сведения о возможных РА представлены в санитарных правилах и нормативах и методических указаниях, регламентирующих обеспечение радиационной безопасности при проведении различных видов диагностических и терапевтических рентгенорадиологических исследований (РРИ). Общие критерии отнесения к РА для всех видов диагностических и терапевтических медицинских ИИИ (МР 2.6.1.0050–11⁸) включают в себя:

- нарушение работы систем сигнализации и блокировки или перемещения источников;
- нарушение герметичности источника;
- разлив, утеря и хищение источников (препаратов);
- прямое воздействие ионизирующего излучения на человека.

Для генерирующих медицинских ИИИ виды РА представлены только для рентгеновских диагностических и терапевтических аппаратов в п. 6.19 СанПиН 2.6.1.1192-03⁹. К таким авариям относятся:

- повреждение радиационной защиты аппарата или кабинета;
- переоблучение персонала или пациентов.

Для ускорителей заряженных частиц (СанПиН 2.6.1.2573-10¹⁰) РА не представлены.

Для медицинских открытых радионуклидных источников перечень общих аварий, характерных как для радионуклидной диагностики, так и для терапии (пп. 7.2–7.4

⁷ СанПиН 2.6.1.2891-11 «Требования радиационной безопасности при производстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации (утилизации) медицинской техники, содержащей источники ионизирующего излучения» [Sanitary Regulations and Standards SanPiN 2.6.1.2891-11 "Requirements on radiation safety for manufacturing, use and decommissioning (utilization) of the medical equipment containing sources of ionizing exposure" (In Russ.)]

⁸ Методические рекомендации «Санитарно-гигиенические требования к мероприятиям по ликвидации последствий радиационной аварии» (МР 2.6.1.0050-11): утверждены и введены в действие с 25.12.2011 г. [Methodical recommendations "Sanitary and hygienic requirements for measures to eliminate the consequences of a radiation accident" (MR 2.6.1.0050-11): approved on 25.12.2011 (In Russ.)]

⁹ СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» [Sanitary Regulations and Standards "Hygienic requirements for the design and operation of X-ray machines and the conduct of X-ray examinations. SanPiN 2.6.1.1192-03". (In Russ.)]

¹⁰ СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ» [Sanitary Regulations and Standards SanPiN 2.6.1.2573-10 "Hygienic requirements for the placement and operation of electron accelerators with energies up to 100 MeV" (in Russ.)]

МУ 2.6.1.1892-04¹¹; пп. 9.2 и 9.3 СанПиН 2.6.1.3288-15¹²; пп. 2.6.3 и 2.6.4 СанПиН 2.6.1.2368-08¹³) включает в себя:

- бой флакона или шприца с радиофармпрепаратом или с другим открытым радионуклидным источником;
- не соответствующую штатной технологии разгерметизацию рабочего объёма генератора радионуклидов, транспортных упаковок, флаконов, фасовок, жидкостных фантомов и калибровочных источников;
- разлив радиоактивного раствора на поверхность оборудования, аппаратуры и мебели;
- попадание радиоактивного раствора на одежду и (или) кожу работающего и (или) пациента;
- утерю радионуклидного источника, флакона или шприца с радиофармпрепаратом;
- обнаружение неучтенного радионуклидного источника;
- ошибочное введение в организм пациента радиофармпрепарата.

При проведении диагностических радионуклидных процедур также отдельно выделяют ошибочное введение в организм пациента радиофармпрепарата с активностью, при которой эффективная доза пациента может превысить 200 мЗв (пп. 7.2–7.4 МУ 2.6.1.1892-04).

Дополнительно к общим авариям в ПЭТ-диагностике (пп. 9.2 и 9.3 СанПиН 2.6.1.3288–15) выделяют:

- задержку полученных на ускорителе радиоактивных изотопов в пневматических линиях транспортировки источников от циклотрона в радиохимическую лабораторию, фасовочную и процедурную;
- нарушение целостности линий доставки полученных на циклотроне радиоактивных изотопов в защитные камеры;
- разгерметизацию защитных камер или фасовочных шкафов во время работы с ИИИ;
- высвобождение ИИИ в результате пожара.

Специфичными для радионуклидной терапии (пп. 2.6.3 и 2.6.4 СанПиН 2.6.1.2368-08) радиационными авариями являются:

- протечки и засоры системы спецканализации подразделения радионуклидной терапии;
- загрязнение радиофармпрепаратом поверхностей «активной» палаты вследствие выделений больного вне санузла «активной» палаты;
- ошибочное введение больному не назначенного ему радиофармпрепарата (РФП) с терапевтической ак-

тивностью, реально влияющей на состояние здоровья пациента;

- введение больному такой терапевтической активности назначенного ему РФП, которая больше или меньше указанной в заявке лечащего врача-радиолога, если только различие запланированной и реально введенной активностей является терапевтически значимым;
- экстравазальное введение терапевтической активности РФП при выполнении внутривенной (внутриартериальной) инъекции.

К РА, возникающим при проведении дистанционной лучевой терапии закрытыми радионуклидными источниками (п. 7.2 МУ 2.6.1.2135-06¹⁴), относят:

- утерю радионуклидного источника излучения;
- застревание радионуклидного источника в рабочем положении или в подводящих каналах внутри радиационной головки дистанционного гамма-терапевтического аппарата или внутри эндостата при контактном облучении;
- возникновение радиоактивных загрязнений на различных рабочих поверхностях и на теле больного (или внутри него) вследствие нарушения целостности герметической оболочки закрытого радионуклидного источника;
- подведение к опухоли и окружающим нормальным тканям (особенно критическим по радиочувствительности) поглощённых доз излучения, значительно превосходящих запланированные дозы, в результате ошибок топографии, дозиметрического планирования, проведения собственно облучения и человеческого фактора;
- переоблучение персонала в результате нарушений установленных технологий работы с источниками излучения, собственной невнимательности или ошибочной интерпретации показаний контрольных приборов, индикаторов и аварийных дозиметров.

Для имплантационной терапии и брахитерапии специфическими РА (п. 11.1 МУ 2.6.1.2712-10¹⁵ будут являться утеря источника, разгерметизация источника и самопроизвольное удаление и выделение источника пациентом.

К нерадиационным авариям во всех рассмотренных нормативно-методических документах относят возгорание или пожар в помещениях, в которых проводятся работы с медицинскими ИИИ; выход из строя (сбой в работе) оборудования для рентгеновской и радионуклидной диагностики и терапии; нарушение электропитания оборудования для рентгеновской и радионуклидной диагностики и терапии; нарушения санитарного состояния

¹¹ Методические указания МУ 2.6.1.1892-04 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов» [МУ 2.6.1.1892-04 “Hygienic requirements on the provision of the radiation safety for the nuclear medicine diagnostics with radiopharmaceuticals” (In Russ.)]

¹² СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии» [Sanitary Regulations and Standards SanPiN 2.6.1.3288-15 “Hygienic requirements on the provision of the radiation safety for the preparation and performance of the positron emission tomography” (In Russ.)]

¹³ СанПиН 2.6.1.2368-08 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников» (далее – СанПиН 2.6.1.2368-08). [Sanitary Regulations and Standards SanPiN 2.6.1.2368-08 “Hygienic requirements for radiation safety during radiation therapy using open radionuclide sources” (In Russ.)]

¹⁴ МУ 2.6.1.2135-06 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при лучевой терапии закрытыми радионуклидными источниками» [МУ 2.6.1.2135-06 Hygienic requirements for radiation safety during radiation therapy by sealed radioactive sources (In Russ.)]

¹⁵ МУ 2.6.1.2712-10 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при внутритканевой лучевой терапии (брахитерапии) методом имплантации закрытых радионуклидных источников» [МУ 2.6.1.2712-10 Hygienic requirements of radiation safety in intratissue radiation therapy (brachytherapy) by implantation of sealed radionuclide sources (In Russ.)].

помещений подразделения рентгеновской диагностики или терапии, или ядерной медицины; а также внешние воздействия криминального характера.

По результатам анализа можно сделать следующие выводы:

- для генерирующих ИИИ аварийные ситуации в соответствующих санитарных правилах и нормативах не представлены в принципе или представлены в обобщенном виде;

- большинство аварийных ситуаций рассматриваются исключительно с точки зрения влияния на персонал отделений рентгеновской и радионуклидной диагностики и терапии;

- четкие критерии идентификации ситуаций с аварийным переоблучением пациентов представлены только для радионуклидной диагностики. К таким ситуациям относят ошибочное введение в организм пациента радиофармпрепарата с активностью, при которой эффективная доза пациента может превысить 200 мЗв. Обоснования выбора именно такого значения эффективной дозы в МУ 2.6.1.1892-04 не представлено. Для всех прочих видов диагностики и терапии используются размытые качественные понятия (например, «введение такой активности препарата ... которая больше или меньше указанной в заявке лечащего врача-радиолога ...»);

- отсутствует согласование аварийных ситуаций между различными документами. Например, при применении открытых радионуклидных источников, экстравазальное введение радиофармацевтического препарата в ОФЭКТ-диагностике (МУ 2.6.1.1892-04) является нарушением радиационной технологии (не аварией); в ПЭТ-диагностике (СанПиН 2.6.1.3288-15) не учитывается в принципе; а в радионуклидной терапии (СанПиН 2.6.1.2368-08) относится к радиационной аварии;

- отсутствуют градации (ранжирование) аварийных (нештатных) ситуаций по степени тяжести и(или) последствий.

Отдельной проблемой является определение аварийной ситуации применительно к пациенту, т.е. вопрос статуса пострадавшего лица (рассматривать ли его в каждом конкретном случае как пациента (т.е. без норматива по облучению) или как лицо из категории населения). Единственное определение термина «Пациент» в отечественных нормативно-правовых актах представлено в Федеральном законе № 323-ФЗ¹⁶. Пациентом является «физическое лицо, которому оказывается медицинская помощь или которое обратилось за оказанием медицинской помощи независимо от наличия у него заболевания и от его состояния». Пациент будет выступать в качестве лица из категории населения лишь при ограниченном количестве радиационных аварийных (нештатных) ситуаций: обнаружении радиоактивного источника; при разливе открытых радионуклидных источников; высвобождении радиоактивных веществ в результате пожара. Все остальные аварийные (нештатные) ситуации прямо или косвенно связаны с процессом диагностики или лечения лица, которое в таком случае однозначно выступает в роли пациента.

В 2003 г. в Российской Федерации были определены численные критерии реагирования на внештатные ситуации, связанные с медицинским диагностическим облучением. Согласно СанПиН 2.6.1.1192-03, при достижении накопленной дозы медицинского диагностического облучения пациента в 500 мЗв должны быть приняты меры по дальнейшему ограничению его облучения. В этом же документе были введены критерии аварийного реагирования и назначения органами здравоохранения специального медицинского обследования граждан. Вместе с тем, необходимо признать, что данные случаи не относятся к аварийным и не подлежат специальному учету, а их выявление до настоящего времени носит случайный характер.

В качестве отдельной группы выступают пациенты – беременные женщины, для которых в отечественной и международной практике используется ограничение поглощенной дозы для эмбриона/плода в 100 мГр за период беременности. Такое ограничение может быть использовано в качестве границы, разделяющей уровень радиационной аварии и радиационного происшествия (инцидента).

Международная практика

В международной практике для описания аварийных (нештатных) ситуаций при медицинском облучении используется большое количество терминов и определений. Под радиационной аварией (radiation accident) 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 и безопасности» [1]. К инциденту (radiation incident) относят «любое носящее непреднамеренный характер событие, включая ошибки при эксплуатации, отказы оборудования, исходные события, события – предшественники аварии, события, близкие к аварийной ситуации, или другие неполадки, или несанкционированные действия злоумышленного или незлоумышленного характера, последствия или потенциальные последствия которого не являются пренебрежимо малыми с точки зрения защиты и безопасности» [1]. Определения аварии и инцидента у МАГАТЭ схожи и отличаются только масштабом последствий. Как правило, к авариям (accident) относят ситуации с наличием пострадавших (жертв) и(или) тяжелых последствий для здоровья; к инцидентам (incident) – все прочие ситуации [9–13].

Для описания небольших по своему масштабу ситуаций используют термин «Событие» (event) – «любое происшествие, не вызванное преднамеренными действиями оператора, включая ошибки во время эксплуатации, отказы оборудования или другие неполадки, а также преднамеренными действиями со стороны других лиц, реальные или потенциальные последствия которого не являются пренебрежимо малыми с точки зрения защиты или безопасности» [1]. Данные термины являются общими для аварийных (нештатных) ситуаций для всех видов ИИИ.

¹⁶ Федеральный закон от 21.11.2011 г. № 323-ФЗ (ред. от 25.12.2023 г.) «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» [Federal Law No. 323-FZ of November 21, 2011 on the Fundamentals of Citizens' Health Protection in the Russian Federation (In Russ.)]

Все три термина являются крайне схожими в формулировках основного стандарта безопасности МАГАТЭ и отличаются исключительно масштабами наступивших последствий происшествия.

Для выделения особого статуса ситуаций при медицинском облучении принято использовать специфические термины: «Случайное (аварийное) или непреднамеренное медицинское облучение (accidental or unintended medical exposure)»; «Незапланированное медицинское облучение (unintended medical exposure)»; «Переоблучение (overexposure), или избыточное [медицинское] облучение (Exposure greater than intended)» [9–13]. Все данные термины относятся к облучению лиц (пациентов) не в той (более высокой) дозе, по сравнению с запланированной (предполагаемой) для данной диагностической или терапевтической процедуры в связи с различными факторами.

Отдельно выделяют события, которые могли бы произойти, но были своевременно выявлены и предотвращены – так называемые «угрозы происшествия (события) (Near miss (event))». В соответствии с глоссарием МАГАТЭ [1, 9] к угрозе происшествия относят потенциально значимое событие, которое могло бы произойти в результате последовательности фактических обстоятельств, но не произошло в силу сложившихся на тот момент условий. Обобщение классификации аварийных (нештатных) ситуаций из международных документов [1, 10–14] с градацией по тяжести и выраженности последствий представлено на рисунке.

В регулирующих документах МАГАТЭ не представлено конкретной классификации ситуаций, относимых к различным подвидам радиационных аварий и происшествий (инцидентов).

В международной практике аварийные (нештатные) ситуации для персонала и пациентов классифицируются в зависимости от вида лучевой диагностики и терапии,

включая вид медицинского ИИИ (генерирующие, открытые, закрытые). Для персонала к общим для всех видов лучевой диагностики и терапии относят следующие категории аварийных (нештатных) ситуаций:

1. Облучение персонала выше установленных пределов доз [1, 2, 10–17];
2. Внешнее облучение персонала с превышением установленной граничной дозы;
3. Облучение беременных работников с превышением эффективной дозы у плода 1 мЗв или с превышением установленной граничной дозы [1, 2, 15–17].

Общей категорией аварийной (нештатной) ситуации в лучевой терапии для персонала является нарушение исправности систем блокировки доступа к источнику [1, 2, 14, 15]. При работе с открытыми радионуклидными источниками в диагностике и терапии к категориям аварийных (нештатных) ситуаций для персонала относят [11, 18–22]:

1. Загрязнение рабочей одежды или рабочих поверхностей радионуклидами.
2. Загрязнение биологическими жидкостями пациентов с содержанием радионуклидов.

При работе с закрытыми радионуклидными источниками в терапии к категориям аварийных (нештатных) ситуаций для персонала относят утерю источника и обнаружение источника [23, 24].

Для пациентов к общим для всех видов лучевой диагностики относят следующие категории аварийных (нештатных) ситуаций [2, 10–13]:

1. Ошибки при назначении или проведении процедур: облучение с диагностическими целями не того пациента, не той анатомической области, или проведение не того исследования, проведение необоснованного повторного исследования).

2. Переоблучение при диагностических процедурах: неисправность работы автоматического контроля экспозиции.

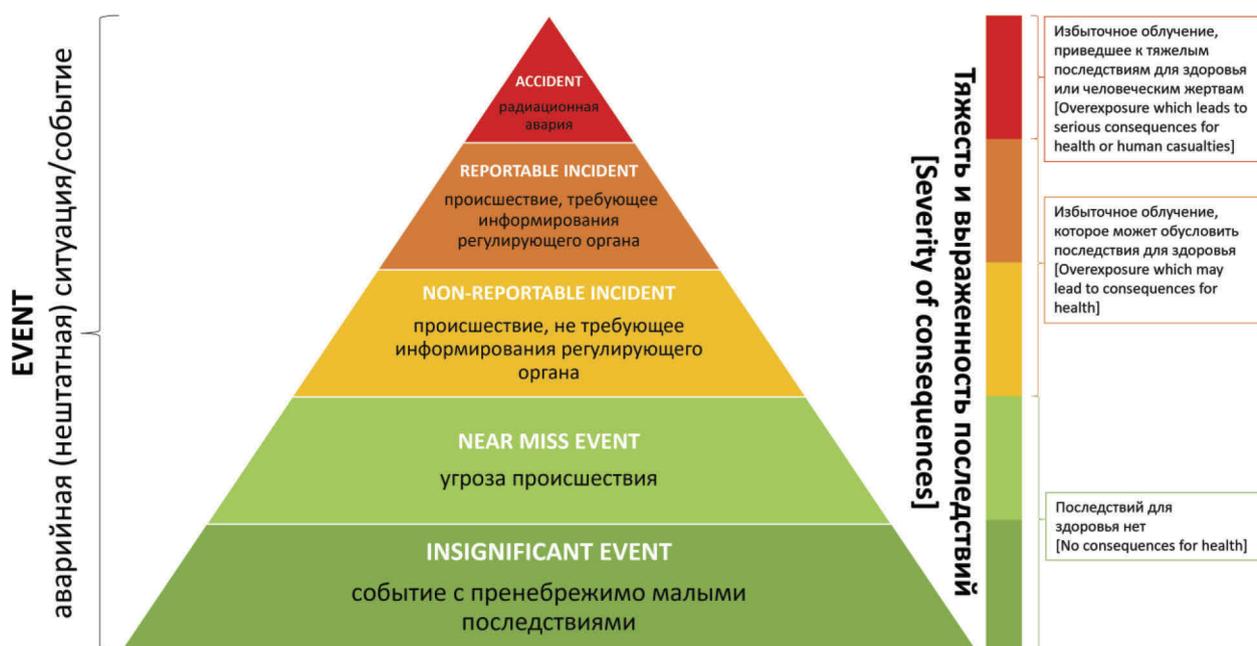


Рис. Классификация аварийных (нештатных) ситуаций
[Fig. Classification of accidents and non-standard situations]

зиции, необоснованное увеличение размера поля (области) облучения [25, 26].

3. Переоблучение при интервенционных процедурах: превышение порога поглощенной дозы в коже, приводящее к развитию детерминированных эффектов [12, 13, 27–34].

4. Непреднамеренное облучение или переоблучение эмбриона/плода: выявление факта беременности после проведения исследования, превышение поглощенной дозы в плоде 100 мГр [35, 36].

При работе с открытыми радионуклидными источниками в диагностике и терапии к категориям аварийных (нештатных) ситуаций для пациентов относят [2, 6, 11]:

1. Ошибочное введение РФП: введение другого диагностического или терапевтического РФП, введение терапевтического РФП вместо диагностического или наоборот, введение неправильной активности РФП, использование некорректного метода введения РФП [20–22].

2. Экстравазальное введение РФП: дифференциация по степени побочных эффектов (до некроза тканей) [18–22].

3. Нарушения требований к качеству РФП: низкая радионуклидная чистота, наличие примесей, ошибки при определении активности радионуклида в РФП.

4. Продолжение грудного вскармливания после введения РФП.

При работе с открытыми радионуклидными источниками в терапии к категориям аварийных (нештатных) ситуаций для пациентов относят [2, 6, 11]:

1. Переоблучение лиц, контактирующих с пациентом после радионуклидной терапии (РНТ), выше установленных граничных уровней.

2. Ошибки в планировании РНТ: ошибки при планировании доз в очаге (органе/мишени), переоблучение органов риска.

При работе с генерирующими источниками и закрытыми радионуклидными источниками в терапии к категориям аварийных (нештатных) ситуаций для пациентов относят [23, 24, 37–42]:

1. Ошибки в планировании РНТ: ошибки при оконтуривании органов, ошибки при составлении плана лечения, ошибки при расчете необходимых доз в очагах и критических органах.

2. Ошибки в отпуске дозы: переоблучение пациента, недооблучение пациента.

Нерадиационные аварии в международной практике, как правило, не выделяются, за исключением развития аллергических реакций или побочных эффектов (нефротоксичности) при введении препаратов [2, 10–13]. Такие ситуации могут возникать в лучевой диагностике (компьютерной томографии, интервенционных исследованиях) при внутрисосудистом введении контрастных средств, а также в радионуклидной диагностике и терапии при введении РФП.

По результатам анализа литературы возможно сделать следующие выводы:

– в международной практике представлена детальная классификация всех возможных аварийных (нештатных) ситуаций, которые могут возникнуть для пациентов, персонала и населения при проведении всей номенклатуры диагностических и терапевтических РПИ;

– основной акцент сделан на различных ситуациях переоблучения (недооблучения) пациентов. Аварийные (нештатные) ситуации для персонала представлены более формально и обобщенно, поскольку не имеют значимых классификационных отличий от аварийных ситуаций в сферах немедицинского использования ИИИ;

– отнесение ситуации к аварийной (нештатной) происходит по факту возникновения события, а не исходя из последствий события;

– дозовые критерии для отнесения ситуации к аварийной в международных документах практически не представлены. Необходимо отметить, что для персонала отнесение события к категории радиационного инцидента будет происходить при превышении не только предела дозы, но и установленной граничной дозы. В лучевой диагностике для пациентов критерием инцидента с переоблучением будет являться превышение ретроспективно определенной дозы облучения пациента соответствующей стандартной дозы или референтного диагностического уровня [35]. В лучевой терапии критерии переоблучения являются более строгими и основываются на превышении установленного допустимого отклонения отпущенной дозы от плана лечения. Для радионуклидной терапии четкие критерии отсутствуют;

– идентификация, расследование, оценка последствий и реагирование на радиационные аварии при медицинском облучении являются неотъемлемой частью программ обеспечения качества в лучевой диагностике/терапии, а не рассматриваются отдельно. При этом отмечается низкая эффективность [12] существующих систем для сбора данных по аварийным (нештатным) ситуациям [43, 44].

Основным вопросом при гармонизации отечественных и международных подходов к классификации радиационных аварий является определение соответствующего понятийного аппарата применительно к медицине. Термин «Радиационная авария», широко используемый в отечественной практике, является избыточно жестким и может быть применен только по отношению к тем группам лиц, для которых установлены соответствующие пределы (ограничения) доз: персонал и население. Следует также рассмотреть возможность использования данного термина в ситуациях значительного переоблучения пациентов, приведших к развитию детерминированных эффектов, в том случае, если детерминированные эффекты не являются побочными для данной процедуры (т.е. за исключением интервенционных исследований) [12, 13, 32, 33].

В зарубежной практике наиболее распространенным является термин «radiation accident» (инцидент) и его производные. Для обеспечения соответствия действующим российским нормативно-правовым актам целесообразно данный термин переводить как «Радиационное происшествие». Большинство аварийных (нештатных) ситуаций для пациентов, персонала и населения по своим масштабам и последствиям укладываются в область применения данного термина. Термин «Событие» (event) является эквивалентом термина «Ситуация» (см. рис.) и может быть использован для описания всех возможных нештатных ситуаций в медицинских организациях (все радиационные происшествия – события, но не все события по своему масштабу и последствиям поднимаются на уровень происшествий).

Достаточно новым для отечественной практики является термин «Угроза происшествия (события)» (Near

miss (event)). Обычно, если какое-либо событие не произошло, то его на практике и не учитывают. Тем не менее, при интеграции системы реагирования на радиационные аварии в медицину в систему обеспечения качества в лучевой диагностике или терапии, такие случаи должны рассматриваться как минимум для предотвращения их развития в будущем или переастиания в полномасштабное происшествие/аварию.

Выводы

1. В рентгеновской и радионуклидной диагностике и терапии возможно возникновение целого спектра аварийных (нештатных) ситуаций, способных негативно повлиять на ход диагностики и лечения. Для совершенствования радиационной защиты при медицинском облучении необходимо своевременно идентифицировать данные ситуации и проводить работу, направленную на предупреждение их возникновения.

2. Необходимо актуализировать отечественные подходы к определению и классификации радиационных аварий в медицине с учетом специфики медицинского облучения. Для этого целесообразно ввести различные уровни аварийных (нештатных) ситуаций, отличающиеся друг от друга масштабами воздействия и последствий для пациентов, персонала и населения. С учетом отсутствия проработанных сценариев аварийных (нештатных) ситуаций в отечественных нормативно-методических документах, такую градацию возможно заимствовать из международных регулирующих документов при условии ее адаптации под специфику и реалии отечественной системы здравоохранения.

3. Необходимо разработать сценарии для типовых аварийных (нештатных) ситуаций, включающие в себя определение ситуации, оценку возможного негативного воздействия на пациента, персонал или население, а также меры по предупреждению таких ситуаций и ликвидации их последствий.

4. Необходимо разработать и внедрить в практику систему сбора сведений о аварийных (нештатных) ситуациях в медицине. Предоставление такой информации не должно быть напрямую ассоциировано с негативными правовыми последствиями для медицинской организации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

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

Рыжов С.А. – разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Петрякова А.В. – поиск и анализ литературы, описание материалов и методов, перевод.

Библин А.М. – анализ результатов.

Горский Г.А. – анализ результатов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора «Разработка и научное обоснование комплекса мер по обеспечению радиационной защиты в ядерной медицине» а также в рамках НИР «Научное развитие медико-технологических и организационных аспектов обеспечения радиационной безопасности при оказании медицинской помощи», (№ ЕГИСУ: №123031500006-9) в соответствии с Приказом от 21.12.2022 г. № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов» Департамента здравоохранения города Москвы.

Литература

1. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna, 2014. 518 p.
2. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA: Vienna, 2018. 340 p.
3. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English / edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow: «Alana», 2009. 312 p. (In Russian).
4. ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. Russian translation under M. Balonov. Saint-Petersburg: NIIRG, 2011. 66 p. (in Russian).
5. Brambilla M., Vassileva J., Kuchcinska A., Rehani M.M. Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures: call for action // *European Radiology*. 2020. Vol. 30. P. 2493-2501. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06528-7>.
6. Brenner D.J., Hricak H. Radiation exposure from medical imaging // *JAMA*. 2010. Vol. 304, No 2. P. 208-209. <https://doi.org/10.1001/jama.2010.973>.
7. Coeytaux K., Bey E., Christensen D. et al. Reported Radiation Overexposure Accidents Worldwide, 1980-2013: A Systematic Review // *PLOS ONE*, 2015. Vol. 10, No 3. P. e0118709. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118709>.
8. IAEA International Nuclear and Radiological Event Scale (INES). Available from: <https://www.iaea.org/resources/databases/international-nuclear-and-radiological-event-scale> (Accessed: 23.01.2024).
9. IAEA Nuclear safety and security glossary. Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response 2022 (interim) edition. IAEA: Vienna, 2022. 248 p.
10. Martin C.J., Vassileva J., Vano E. et al. Unintended and accidental medical radiation exposures in radiology: guidelines on investigation and prevention // *Journal of Radiological Protection*. 2017. Vol. 37, No 4. P. 883. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa881e>.
11. Marengo M., Martin C.J., Rubow S. et al. Radiation Safety and Accidental Radiation Exposures in Nuclear Medicine. Seminars in Nuclear Medicine // 2022. Vol. 52, No 2. P. 94-113 <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2021.11.006>.
12. Holmberg O., Pinak M. How often does it happen? A review of unintended, unnecessary and unavoidable high-dose radiation exposures // *Journal of Radiological Protection*. 2021. Vol. 41, No 4. P. 189-201 <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac0d64>.
13. Jaschke W., Bartal G., Martin C.J., Vano E. Unintended and Accidental Exposures, Significant Dose Events and Trigger

- Levels in Interventional Radiology // CardioVascular and Interventional Radiology. 2020. Vol. 43. P. 1114–1121 <https://doi.org/10.1007/s00270-020-02517-2>.
14. Huq M.S., Fraass B.A., Dunscombe P.B. et al. The report of Task Group 100 of the AAPM: Application of risk analysis methods to radiation therapy quality management // Medical Physics. 2016. Vol. 43, No 7. P. 4209-4262 <https://doi.org/10.1118/1.4947547>.
 15. General Safety Guide. GSG-7. Occupational Radiation Protection. IAEA: Vienna, 2018. 360 p.
 16. International Commission on Radiological Protection. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP Publication 113 // Annals of the ICRP. 2016. Vol. 39, No 5.
 17. International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures outside the imaging department. ICRP Publication 117 // Annals of the ICRP. 2010. Vol. 40, No 6.
 18. Yenson T., Larcos G., Collins L.T. Radiopharmaceutical maladministrations in New South Wales // Nuclear medicine communications. 2005. Vol. 26, No 11. P. 1037-1041. <https://doi.org/10.1097/01.mnm.0000183798.81968.45>.
 19. Larcos G.S., Collins L.T., Georgiou A., Westbrook J.I. Maladministrations in nuclear medicine: revelations from the Australian // Medical Journal of Australia. 2014. Vol. 200, No 1. P. 37-40. <https://doi.org/10.5694/mja13.10145>.
 20. Larcos G., Collins L.T., Georgiou A., Westbrook J.I. Nuclear medicine incident reporting in Australia: control charts and notification rates inform quality improvement // Internal Medicine Journal. 2015. Vol. 45, No 6. P. 609-617. <https://doi.org/10.1111/imj.12758>.
 21. Kearney N., Denham G. Recommendations for nuclear medicine technologists drawn from an analysis of errors reported in Australian Radiation Incident Registers // Journal of Nuclear Medicine Technology. 2016. Vol. 44, No 4. P. 243-247. <https://doi.org/10.2967/jnmt.116.178517>.
 22. Mansouri M., Shaqdan K.W., Aran S. et al. Safety incident reporting in emergency radiology: analysis of 1717 safety incident reports // Emergency radiology. 2015. Vol. 22. P. 623-630. <https://doi.org/10.1007/s10140-015-1336-3>.
 23. International Commission on Radiological Protection. Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy. ICRP Publication 86 // Annals of the ICRP. 2000. Vol. 30, No 3.
 24. Felder S., Morley L., Ng E. et al. Brachytherapy patient safety events in an academic radiation medicine program. Brachytherapy. 2018. Vol. 17, No 1. P. 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2017.06.010>.
 25. Mansouri M., Aran S., Shaqdan K.W., Abujudeh H.H. How often are patients harmed when they visit the computed tomography suite? A multi-year experience, in incident reporting, in a large academic medical center // European Radiology. 2016. Vol. 26. P. 2064-2072. <https://doi.org/10.1007/s00330-015-4061-0>.
 26. Lacson R., Cochon L., Ip I. et al. Classifying safety events related to diagnostic imaging from a safety reporting system using a human factors framework // Journal of the American College of Radiology. 2019. Vol. 16, No 3. P. 282-288 <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2018.10.015>.
 27. Koenig T.R., Wolff D., Mettler F.A., Wagner L.K. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures. Part 1, Characteristics of radiation injury // American journal of roentgenology. 2001. Vol. 177, No 1. P. 3-11. <https://doi.org/10.2214/ajr.177.1.1770003>.
 28. Koenig T.R., Mettler F.A., Wagner L.K. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures. Part 2, Review of 73 cases and recommendations for minimising dose delivered to the patient // American Journal of Roentgenology. 2001. Vol. 177, No 1. P. 13-20. <https://doi.org/10.2214/ajr.177.1.1770013>.
 29. Imanishi Y., Fukui A., Niimi H. et al. Radiation-induced temporary hair loss as a radiation damage only occurring in patients who had the combination of MDCT and DSA // European radiology. 2005. Vol. 15. P. 41-46. <https://doi.org/10.1007/s00330-004-2459-1>.
 30. Mooney R.B., McKinstry C.S., Kamel H.A. Absorbed dose and deterministic effects to patients from interventional neuroradiology // The British journal of radiology. 2000. Vol. 73, No 871. P. 745-751. <https://doi.org/10.1259/bjr.73.871.11089467>.
 31. National Council on Radiation Protection and Measurement: Radiation dose management for fluoroscopically guided interventional procedures NCRP Report No. 168. 2011.
 32. National Council on Radiation Protection and Measurement. Statement No. 11. Outline of Administrative Policies for Quality Assurance and Peer Review of Tissue Reactions Associated with Fluoroscopically-Guided Interventions. 2014.
 33. Rehani M.M., Srimahachota S. Skin injuries in interventional procedures // Radiation protection dosimetry. 2011. Vol. 147, No 1-2. P. 8-12. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr257>.
 34. Guesnier-Dopagne M., Boyer L., Pereira B. et al. Incidence of chronic radiodermatitis after fluoroscopically-guided interventions (FGI): a retrospective study // Journal of Vascular and Interventional Radiology. 2019. Vol. 30, No 5. P. 692-698. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2019.01.010>.
 35. Patient safety in medical imaging: A joint paper of the European Society of Radiology (ESR) and the European Federation of Radiographer Societies (EFRS) // Radiography. 2019. Vol. 25, No 2. P. e26-e38. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2019.01.009>.
 36. Damilakis J. Radiation incidents and accidents in diagnostic and interventional radiology. What to do next in pregnant patients // Physica Medica. 2016. Vol. 32. P. 195. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2016.07.349>.
 37. Ford E.C. Terezakis S. How safe is safe? Risk in radiotherapy // International journal of radiation oncology, biology, physics. 2010. Vol. 78, No 2. P. 321-322. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.04.047>.
 38. Huang G., Medlam G., Lee J. et al. Error in the delivery of radiation therapy: results of a quality assurance review // International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics. 2005. Vol. 61, No 5. P. 1590-1595. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2004.10.017>.
 39. Williams M.V., Frew T.L. How dangerous is radiotherapy? // International journal of radiation oncology, biology, physics. 2011. Vol. 79, No 5. P. 1601. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.10.055>.
 40. Morgan G. Re: editorial: how safe is safe? Risk in radiotherapy // International journal of radiation oncology, biology, physics. 2011. Vol. 79, No 5. P. 1602. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.10.054>.
 41. Clark B.G., Brown R.J., Ploquin J.L. et al. The management of radiation treatment error through incident learning // Radiotherapy and Oncology. 2010. Vol. 95, No 3. P. 344-349. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2010.03.022>.
 42. Malicki J., Bly R., Bulot M. et al. Patient safety in external beam radiotherapy, results of the ACCIRAD project: Recommendations for radiotherapy institutions and national authorities on assessing risks and analysing adverse error-events and near misses // Radiotherapy and Oncology. 2018. Vol. 127, No 2. P. 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2018.04.006>.
 43. IAEA. SAFRON International Atomic Energy Agency – Safety in Radiation Oncology. URL: <http://www.iaea.org/resources/rpop/resources/databases-and-learning-systems/safron> (Дата обращения: 20.01.2024).
 44. IAEA. SAFRAD International Atomic Energy Agency – Safety in Radiological Procedures. URL: <http://www.iaea.org/resources/rpop/resources/databases-and-learning-systems/safrad> (Дата обращения: 20.01.2024).
 45. Holmberg O., Czarwinski R., Mettler F. The importance and unique aspects of radiation protection in medicine //

- European Journal of Radiology. 2010. Vol. 76. P. 6–10.
46. Rosenthal L.S., Beck T.J., Williams J.R. et al. Acute radiation dermatitis following radiofrequency catheter ablation of atrioventricular nodal Re-entrant tachycardia. PACE. 1997. No 20. P. 1834–9.
47. Vliestra R.E., Wagner L.K., Koenig T., Mettler F. Radiation burns as a severe complication of fluoroscopically guided cardiologic interventions // Journal of Interventional Cardiology. 2004. Vol. 17. P. 131–42.
48. Kasalak Ö., Yakar D., Dierckx R.A.J.O., Kwee T.C. Patient safety in nuclear medicine: identification of key strategic areas for vigilance and improvement // Nuclear Medicine Communications. 2020. No 41. P. 1111–6.
49. Applegate K.E., Findlay Ú., Fraser L. et al. Radiation exposures in pregnancy, health effects and risks to the embryo/foetus—information to inform the medical management of the pregnant patient // Journal of Radiological Protection. 2021. No 41. P. 522-539.

Поступила: 24.01.2024 г.

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

ORCID 0000-0002-5191-7535

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

ORCID 0000-0001-9153-3061

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

ORCID 0000-0002-0640-7368

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

ORCID 0000-0003-2663-9091

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

ORCID 0000-0002-3139-2479

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

ORCID: 0000-0001-7310-9718

Для цитирования: Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Петрякова А.В., Библин А.М., Горский Г.А. Радиационные аварии в лучевой и радионуклидной диагностике и терапии: сравнение российских и международных подходов к терминологии и классификации // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 97-110. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110

Radiation accidents in X-ray and radionuclide diagnostics and therapy: comparison of Russian and international approaches to the terminology and classification

Aleksandr V. Vodovatov^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Sergey A. Ryzhov^{5,6,7}, Anastasia V. Petryakova^{1,8}, Artem M. Biblin¹, Grigory A. Gorsky^{1,9}

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

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

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

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

⁵ Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

⁶ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁷ Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

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

⁹ I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Introduction of new methods of nuclear medicine, X-ray diagnostics and therapy using medical sources of ionizing radiation inevitably leads to an increase in the number and types of accidents (abnormal situations). In international practice in recent years, special attention has been paid to the prevention of radiation accidents and incidents from medical exposure. The main focus is put on accidental exposure (overexposure) of patients in X-ray and radionuclide diagnostics and therapy. These approaches are implemented in Russian regulatory and methodological documents in a limited and formal way. The main attention is paid to large-scale technogenic radiation accidents, and accidents (abnormal situations) from medical irradiation are undeservedly ignored. The aim of the work was to analyze the terminology and classification of radiation accidents and incidents from medical exposure in the Russian Federation and foreign countries to develop proposals to improve approaches to their classification within the framework of revision of existing regulatory and methodological documents. The results of the work indicate that it is necessary to actualize Russian approaches to the definition and classification of radiation accidents in medicine considering the specifics of medical exposure. For this purpose, it is advisable to introduce different levels of accidents (abnormal situations), differing from each other by the scale of impact and consequences for patients, workers and public. Considering the absence of elaborated scenarios of accidents (abnormal situations) in Russian regulatory and methodological documents, such gradation can be borrowed from international regulatory documents provided that it is adapted to the specifics and realities of the Russian health care system.

Key words: radiation accident, radiation incident, medical exposure, patients, staff.

Personal contribution of authors

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

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

Ryzhov S.A. – development of the study design, analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Petryakova A.V. – search and analysis of literature, description of materials and methods, translation.

Biblin A.M. – analysis of the results.

Gorsky G.A. – analysis of the results.

Conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The work was performed as a part of the program of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being “Development and scientific justification of a set of measures to ensure radiation protection in nuclear medicine” and within the framework of the research work «Scientific development of medical-technological and organizational aspects of radiation safety in the provision of medical care», (No. EGISU: №123031500006-9) in accordance with the Order of 21.12.2022 № 1196 «On approval of state tasks, financial support of which is carried out at the expense of the budget of the city of Moscow to state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Department of Health of the city of Moscow, for 2023 and the planning period of 2024 and 2025 years» of the Department of Health of the city of Moscow.

Aleksandr V. Vodovatov

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

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

References

- IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna; 2014. 518 p.
- Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA: Vienna; 2018. 340 p.
- ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English / edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow: «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian).
- ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. Russian translation under M. Balonov. Saint-Petersburg: NIIRG; 2011. 66 p. (in Russian).
- Brambilla M, Vassileva J, Kuchcinska A, Rehani MM. Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures: call for action. *European Radiology*. 2020;30: 2493-2501. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06528-7>.
- Brenner DJ, Hricak H. Radiation exposure from medical imaging. *JAMA*. 2010;304(2): 208-209. <https://doi.org/10.1001/jama.2010.973>.
- Coeytaux K, Bey E, Christensen D, Glassman ES, Murdock B, Doucet Ch. Reported Radiation Overexposure Accidents Worldwide, 1980-2013: A Systematic Review. *PLOS ONE*. 2015;10(3): e0118709. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118709>.
- IAEA International Nuclear and Radiological Event Scale (INES). Available from: <https://www.iaea.org/resources/databases/international-nuclear-and-radiological-event-scale> (Accessed: 23.01.2024).
- IAEA Nuclear safety and security glossary. Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response 2022 (interim) edition. IAEA: Vienna; 2022. 248 p.
- Martin CJ, Vassileva J, Vano E, Mahesh M, Ebdon-Jackson S, Ng KH, et al. Unintended and accidental medical radiation exposures in radiology: guidelines on investigation and prevention. *Journal of Radiological Protection*. 2017;37(4): 883. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa881e>.
- Marengo M, Martin CJ, Rubow S, Sera T, Amador Z, Torres L. Radiation Safety and Accidental Radiation Exposures in Nuclear Medicine. *Seminars in Nuclear Medicine*. 2022;52(2): 94-113 <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2021.11.006>.
- Holmberg O, Pinak M. How often does it happen? A review of unintended, unnecessary and unavoidable high-dose radiation exposures. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(4): 189–201 <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac0d64>.
- Jaschke W, Bartal G, Martin CJ, Vano E. Unintended and Accidental Exposures, Significant Dose Events and Trigger Levels in Interventional Radiology. *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2020;43: 1114–1121 <https://doi.org/10.1007/s00270-020-02517-2>.
- Huq MS, Fraass BA, Dunscombe PB, Gibbons JP Jr, Ibbott GS, Mundt AJ, et al. The report of Task Group 100 of the AAPM: Application of risk analysis methods to radiation therapy quality management. *Medical Physics*. 2016;43(7): 4209-4262 <https://doi.org/10.1118/1.4947547>.
- General Safety Guide. GSG-7. Occupational Radiation Protection. IAEA: Vienna; 2018. 360 p.
- International Commission on Radiological Protection. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP Publication 113. *Annals of the ICRP*. 2016;39(5).
- International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures outside the imaging department. ICRP Publication 117. *Annals of the ICRP*. 2010;40(6).
- Yenson T, Larcos G, Collins LT. Radiopharmaceutical maladministrations in New South Wales. *Nuclear medicine communications*. 2005;26(11): 1037-1041. <https://doi.org/10.1097/01.mnm.0000183798.81968.45>.
- Larcos GS, Collins LT, Georgiou A, Westbrook JL. Maladministrations in nuclear medicine: revelations from the Australian. *Medical Journal of Australia*. 2014;200(1): 37-40. <https://doi.org/10.5694/mja13.10145>.
- Larcos G, Collins LT, Georgiou A, Westbrook JL. Nuclear medicine incident reporting in Australia: control charts and notification rates inform quality improvement. *Internal Medicine Journal*. 2015;45(6): 609-617. <https://doi.org/10.1111/imj.12758>.
- Kearney N, Denham G. Recommendations for nuclear medicine technologists drawn from an analysis of errors reported in Australian Radiation Incident Registers. *Journal of Nuclear Medicine Technology*. 2016;44(4): 243-247. <https://doi.org/10.2967/jnmt.116.178517>.
- Mansouri M, Shaqdan KW, Aran S, Raja AS, Lev MH, Abujudeh HH. Safety incident reporting in emergency radiology: analysis of 1717 safety incident reports. *Emergency radiology*. 2015;22: 623-630. <https://doi.org/10.1007/s10140-015-1336-3>.
- International Commission on Radiological Protection. Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy. ICRP Publication 86. *Annals of the ICRP*. 2000;30(3).
- Felder S, Morley L, Ng E, Chan K, Ballantyne H, Di Tomasso A, et al. Brachytherapy patient safety events in an academic radiation medicine program. *Brachytherapy*. 2018;17(1): 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2017.06.010>.
- Mansouri M, Aran S, Shaqdan KW, Abujudeh HH. How often are patients harmed when they visit the computed tomography suite? A multi-year experience, in incident reporting, in a large academic medical center. *European Radiology*. 2016;26: 2064-2072. <https://doi.org/10.1007/s00330-015-4061-0>.
- Lacson R, Cochon L, Ip I, Desai S, Kachalia A, Dennerlein J, et al. Classifying safety events related to diagnostic imaging from a safety reporting system using a human factors framework. *Journal of the American College of Radiology*. 2019;16(3): 282-288 <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2018.10.015>.
- Koenig TR, Wolff D, Mettler FA, Wagner LK. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures. Part 1, Characteristics of radiation injury. *American journal of roentgenology*. 2001;177(1): 3-11. <https://doi.org/10.2214/ajr.177.1.1770003>.
- Koenig TR, Mettler FA, Wagner LK. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures. Part 2, Review of 73 cases and recommendations for minimizing dose delivered to the patient. *American Journal of Roentgenology*. 2001;177(1): 13-20. <https://doi.org/10.2214/ajr.177.1.1770013>.
- Imanishi Y, Fukui A, Niimi H, Itoh D, Nozaki K, Nakaji S, et al. Radiation-induced temporary hair loss as a radiation damage only occurring in patients who had the combination of MDCT and DSA. *European radiology*. 2005;15: 41-46. <https://doi.org/10.1007/s00330-004-2459-1>.
- Mooney RB, McKinstry CS, Kamel HA. Absorbed dose and deterministic effects to patients from interventional neuroradiology. *The British journal of radiology*. 2000;73(871): 745-751. <https://doi.org/10.1259/bjr.73.871.11089467>.
- National Council on Radiation Protection and Measurement: Radiation dose management for fluoroscopically guided interventional procedures NCRP Report No. 168. 2011.
- National Council on Radiation Protection and Measurement. Statement No. 11. Outline of Administrative Policies for Quality Assurance and Peer Review of Tissue Reactions Associated with Fluoroscopically-Guided Interventions. 2014.
- Rehani MM, Srimahachota S. Skin injuries in interventional procedures. *Radiation protection dosimetry*. 2011;147(1-2): 8-12. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr257>.

34. Guesnier-Dopagne M, Boyer L, Pereira B, Guersen J, Motreff P, D'Incan M. Incidence of chronic radiodermatitis after fluoroscopically-guided interventions (FGI): a retrospective study. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2019;30(5): 692-698 <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2019.01.010>.
35. Patient safety in medical imaging: A joint paper of the European Society of Radiology (ESR) and the European Federation of Radiographer Societies (EFRS). *Radiography*. 2019;25(2): e26-e38. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2019.01.009>.
36. Damilakis J. Radiation incidents and accidents in diagnostic and interventional radiology. What to do next in pregnant patients. *Physica Medica*. 2016;32: 195 <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2016.07.349>.
37. Ford EC, Terezakis S. How safe is safe? Risk in radiotherapy. *International journal of radiation oncology, biology, physics*. 2010;78(2): 321-322. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.04.047>.
38. Huang G, Medlam G, Lee J, Billingsley S, Bissonnette JP, Ringash J, et al. Error in the delivery of radiation therapy: results of a quality assurance review. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2005;61(5): 1590-1595. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2004.10.017>.
39. Williams MV, Frew TL. How dangerous is radiotherapy? *International journal of radiation oncology, biology, physics*. 2011;79(5): 1601. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.10.055>.
40. Morgan G. Re: editorial: how safe is safe? Risk in radiotherapy. *International journal of radiation oncology, biology, physics*. 2011;79(5): 1602. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.10.054>.
41. Clark BG, Brown RJ, Ploquin JL, Kind AL, Grimard L. The management of radiation treatment error through incident learning. *Radiotherapy and Oncology*. 2010;95(3): 344-349. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2010.03.022>.
42. Malicki J, Bly R, Bulot M, Godet JL, Jahnen A, Krenkli M, et al. Patient safety in external beam radiotherapy, results of the ACCIRAD project: Recommendations for radiotherapy institutions and national authorities on assessing risks and analysing adverse error-events and near misses. *Radiotherapy and Oncology*. 2018;127(2): 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2018.04.006>.
43. IAEA. SAFRON International Atomic Energy Agency – Safety in Radiation Oncology. Available from: <http://www.iaea.org/resources/rpop/resources/databases-and-learning-systems/safron> (Accessed: 20.01.2024).
44. IAEA. SAFRAD International Atomic Energy Agency – Safety in Radiological Procedures. Available from: <http://www.iaea.org/resources/rpop/resources/databases-and-learning-systems/safrad> (Accessed: 20.01.2024).
45. Holmberg O, Czarwinski R, Mettler F. The importance and unique aspects of radiation protection in medicine. *European Journal of Radiology*. 2010;76: 6–10.
46. Rosenthal LS, Beck TJ, Williams JR, Mahesh M, Herman MG, Dinerman JL, et al. Acute radiation dermatitis following radiofrequency catheter ablation of atrioventricular nodal Re-entrant tachycardia. *PACE*. 1997;20: 1834–9.
47. Vliestra RE, Wagner LK, Koenig T, Mettler F. Radiation burns as a severe complication of fluoroscopically guided cardiovascular interventions. *Journal of Interventional Cardiology*. 2004;17: 131–42.
48. Kasalak Ö, Yakar D, Dierckx RAJO, Kwee TC. Patient safety in nuclear medicine: identification of key strategic areas for vigilance and improvement. *Nuclear Medicine Communications*. 2020;41: 1111–6.
49. Applegate KE, Findlay Ú, Fraser L, Kinsella Y, Ainsbury L, Bouffler S. Radiation exposures in pregnancy, health effects and risks to the embryo/foetus—information to inform the medical management of the pregnant patient. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41: 522-539.

Received: January 24, 2024

For correspondence: Aleksandr V. Vodovatov – Ph.D., Head of Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com) ORCID 0000-0002-5191-7535

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

Sergey A. Ryzhov – vice president, Association of Medical Physicists in Russia; research fellow, Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies; head of the radiation safety and medical physics department, Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia ORCID 0000-0002-0640-7368

Anastasia V. Petryakova – acting junior researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; radiation safety engineer, Saint-Petersburg City Hospital No. 40, Saint-Petersburg, Russia ORCID 0000-0003-2663-9091

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

Grigory A. Gorsky – Ph.D., Deputy Director of the Innovation work, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Petryakova A.V., Biblin A.M., Gorsky G.A. Radiation accidents in X-ray and radionuclide diagnostics and therapy: comparison of Russian and international approaches to the terminology and classification. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1, P. 97-110. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110

Радиационно-гигиеническая обстановка в районе размещения хранилищ отходов сублиматного производства АО «АЭХК»

Ю.Н. Зозуль¹, С.М. Киселёв¹, В.В. Шлыгин¹, С.В. Ахромеев¹, А.Н. Малахова¹, Т.И. Гимадова¹, Ю.С. Бельских¹, Ю.В. Арчакова², Л.Н. Галицкая²

¹ Государственный научный центр Российской Федерации - Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия
² Центр гигиены и эпидемиологии № 28 Федерального медико-биологического агентства России, Ангарск, Россия

В соответствии с основами государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности государственная корпорация «Росатом» осуществляет реабилитацию объектов ядерного наследия акционерного общества «АЭХК». В статье представлены результаты комплексного исследования состояния загрязнения окружающей среды, проведенного в период 2021–2023 гг. в районе расположения хранилищ отходов сублиматного производства акционерного общества «АЭХК», где осуществляются работы по выводу из эксплуатации. Исследования радиационно-гигиенической обстановки включали оценку мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на местности, отбор проб объектов окружающей среды (почвогрунт, подземные воды наблюдательных скважин) с анализом содержания загрязнителей радиационной и нерадиационной природы. Радиационная обстановка, включая мощность дозы гамма-излучения, содержание природных и техногенных радионуклидов в почвогрунте в районе расположения исследуемых объектов, характеризуется фоновыми значениями. Анализ загрязнения подземных вод выявил наличие урана, концентрация которого на порядок и более превышает фоновые уровни. Показано, что в районе обводненных карт шламоотстойников наблюдаются максимальные уровни удельной суммарной альфа-активности и содержания урана. Полученные данные свидетельствуют о том, что накопленное содержимое шламоотстойников (донные отложения, пульпа) взаимодействует с природными водами. Сложившаяся ситуация требует проведения мониторинговых исследований динамики распространения урана и других загрязнителей с подземными водами. Рекомендована оптимизация существующих программ мониторинга состояния загрязнения окружающей среды в санитарно-защитной зоне предприятия. Предложены референсные уровни содержания урана для дальнейшего наблюдения за состоянием загрязнения подземных вод.

Ключевые слова: мониторинг, вывод из эксплуатации, уран, подземные воды, отходы, сублиматное производство.

Введение

Акционерное общество «Ангарский электролизный химический комбинат» (АО «АЭХК», входит в Топливную компанию Росатома «ТВЭЛ») – предприятие по производству обогащенного гексафторида урана, применяемого для изготовления ядерного топлива для атомных электростанций. В настоящее время АО «АЭХК» осуществляет свою деятельность в рамках разделительного производства (разделение изотопов урана в газовых центрифугах для получения обогащенного по урану-235 сырья для изготовления ТВЭЛов). До 2014 г. в АО «АЭХК» также функционировало сублиматное производство безводного фтористого водорода и фтора с последующим переводом урана в форму гексафторида (ГФУ).

Технология обогащения урана, используемая в сублиматном производстве, включала перевод его в шести-

валентную форму U^{+6} с применением азотной кислоты и с последующей его экстракцией. В период до 1993 г., наряду с сырьем природного происхождения, на АО «АЭХК» перерабатывалось и сырье вторичного происхождения (регенерированное сырье), которое содержало трансурановые элементы. В ходе технологического процесса образовывались закисленные отходы, которые после нейтрализации гашеной известью размещались в шламоотстойники за территорией промплощадки АО «АЭХК». Также за территорией промплощадки АО «АЭХК» в специально оборудованных хранилищах подземного типа размещались твердые радиоактивные отходы (РАО) и отработавшие источники ионизирующего излучения (ИИИ).

Особенностью АО «АЭХК» является его нахождение в границах экологической зоны атмосферного влияния Байкальской природной территории. На Байкальской

Зозуль Юлия Николаевна

Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна

Адрес для переписки: 123098, Москва, ул. Живописная, 46; E-mail: julnik@list.ru

природной территории, согласно статье 6 Федерального закона от 01.05.1999 г. № 94-ФЗ «Об охране озера Байкал»¹, запрещаются или ограничиваются виды деятельности, при осуществлении которых оказывается негативное воздействие на уникальную экологическую систему озера Байкал, связанное со сбросами и с выбросами вредных веществ, размещением отходов производства и потребления.

С 2010 г. АО «АЭХК» нарабатывает уникальные компетенции, осуществляя вывод из эксплуатации объектов ядерного наследия и реабилитацию загрязненных территорий в соответствии с основами государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности (Распоряжение Правительства РФ от 19.04.2007 г. № 484-р²). На сегодняшний день в санитарно-защитной зоне за пределами промплощадки предприятия осуществляются работы по консервации шламоотстойников и выводу из эксплуатации хранилищ технологических отходов сублиматного производства.

Многофакторный характер выбросов, сопровождающий производственную деятельность предприятия, а также заявленный состав отходов, хранящихся в выводимых из эксплуатации хранилищах и шламоотстойниках, определили необходимость оценки существующего состояния загрязнения территории перед проведением планируемых работ по выводу из эксплуатации хранилищ РАО (состояние на 2021 г.) и в ходе выполнения работ.

Цель исследования – изучение радиационно-гигиенической обстановки для оценки существующего состояния загрязнения окружающей среды, определения приоритетных загрязнителей и оптимизации мониторинговых исследований в ходе проведения работ по выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия АО «АЭХК» и после их завершения.

Характеристика района размещения объектов ядерного наследия

Хранилища технологических отходов сублиматного производства АО «АЭХК» (комплекс сооружений 310, 311 и 325) являются потенциальными источниками загрязнения окружающей среды. Сооружения располагаются на территории санитарно-защитной зоны предприятия и находятся в городской черте города Ангарска (рис. 1). В условиях деградации инженерных барьеров одним из основных путей распространения загрязнения в окружающую среду является миграция с подземными водами. Этому способствуют почвенно-геологические особенности местности. Вмещающими грунтами являются аллювиальные мелко- и среднезернистые пески в естественном залегании и техногенные грунты, представленные теми же песками, перемещенными в результате производственной деятельности [1]. По данным

многолетних наблюдений, уровень стояния грунтовых вод характеризуется относительной стабильностью. Уровень стояния воды в сети наблюдательных скважин в весенне-летне-осенний период составляет в среднем 9 м от поверхности, изменяясь в диапазоне от 4 до 18 м. Основное направление движения грунтовых вод – северное и северо-восточное, от площадки АО «АЭХК» к реке Ангара [2]. Дополнительным путем распространения загрязнения в ходе вывода из эксплуатации хранилищ твердых РАО являются атмосферные выбросы в процессе извлечения и перетаривания отходов на участках обращения с РАО. Вероятность влияния возможных атмосферных выбросов радионуклидов и других загрязняющих веществ на окружающую среду и население близлежащих поселков минимизирована принятыми защитными мерами оператора площадки с учетом особенностей ветрового режима местности.

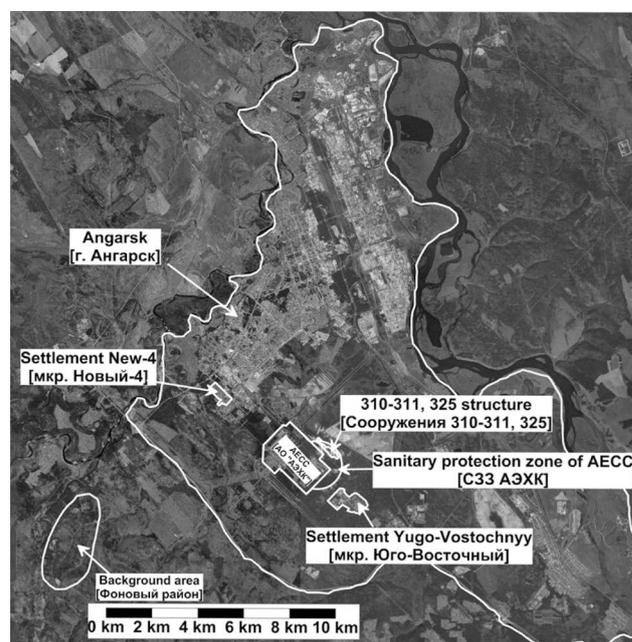


Рис. 1. Карта размещения хранилищ отходов сублиматного производства АО «АЭХК»
[Fig. 1. The area of waste storage facilities of JSC «АЕСС»]

Хранилище твердых радиоактивных отходов (сооружение 310) представляет собой комплекс сооружений в виде монолитных железобетонных конструкций суммарным объемом около 11 000 м³, обвалованных сверху насыпью грунта. В состав отходов входят твердые радиоактивные отходы химического цеха сублиматного производства, содержащие изотопы урана, трансурановые элементы, оксид железа, пластикат, а также отработавшие источники ионизирующего излучения. Содержание

¹ Федеральный закон от 1 мая 1999 г. № 94-ФЗ «Об охране озера Байкал». Принят Государственной Думой 2 апреля 1999 г. Одобрен Советом Федерации 22 апреля 1999 г. [Federal Law of May 1, 1999 N 94-FZ On the Protection of Lake Baikal. Adopted by the State Duma on April 2, 1999. Approved by the Federation Council on April 22, 1999 (In Russ)].

² Распоряжение Правительства РФ от 19.04.2007 г. № 484-р «О Концепции федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» [Order of the Government of the Russian Federation dated April 19, 2007 N 484-r "On the Concept of the federal target program "Ensuring nuclear and radiation safety for 2008 and for the period until 2015" (In Russ)].

урана в отходах варьирует от 0,64 до 1%, преобладающая форма урана – соли и оксиды урана [3]. Отходы производства находятся в твердом агрегатном состоянии и относятся к категории удаляемых отходов. В 2021 г. начаты работы по выводу из эксплуатации хранилищ твердых РАО (сооружение 310) по сценарию «Ликвидация» с последующей реабилитацией загрязненных территорий. На площадке создана инфраструктура обращения с РАО, осуществляется выгрузка, инвентаризация, перетаривание контейнеризованных отходов и временное их размещение до передачи национальному оператору. По состоянию на осень 2023 г. от насыпного грунта до подошвы фундамента освобождены часть бетонных хранилищ РАО, завершается первый этап извлечения и переработки РАО. Выгруженные хранилища законсервированы до принятия проектных решений по их удалению.

Комплекс сооружений шламоотстойников жидких отходов сублиматного производства, нейтрализованных гашеной известью (сооружение 311), состоит из 6 карт. Карты представляют собой наземные открытые емкости прямоугольной формы размерами 100 × 70 м и вместимостью 17 000 м³ (сооружения I–IV) и 18 000 м³ (сооружения V–VI). Шламоотстойники были заполнены до проектных уровней, мощность слоя илов составляет около 2,5 м [3, 4]. Отстаивание пульпы происходит с накоплением на дне твердого осадка, содержащего соли урана.

По состоянию на 2023 г.: карты I и II законсервированы в соответствии с проектной документацией с применением технологии покрытия поверхности хранилищ водонепроницаемым материалом с насыпным грунтом для предотвращения загрязнения атмосферного воздуха пылепереносом, на картах III и IV осуществляются работы по консервации. Карты V–VI представляют собой поверхностные водные объекты, сброс пульпы прекращен в 2012 г., в настоящее время эксплуатируются в режиме «остановки» с поддержанием в безопасном состоянии, исключая пылеперенос. Доступ к картам V и VI не ограничен, вопрос о консервации не решен, рассматривается вариант окончательной изоляции иловых отложений на месте в статусе особых РАО.

Комплекс сооружений 325 представляет шламовые поля, где хранятся фторгипсовые отвалы – твердые отходы производства безводного фтористого водорода химического цеха сублиматного производства (серноокислотное разложение плавикового шпата). Отвалы фторгипса представляют собой плоские залежи пастообразной массы светло-серого цвета. Территория сооружений 325 не огорожена, доступ населения не ограничен.

Методы и средства исследования

Исследования радиационно-гигиенической обстановки включали измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) на местности, отбор проб объектов окружающей среды (почвогрунт, подземные воды наблюдательных скважин) для анализа содержания загрязнителей радиационной природы и токсичных металлов.

В качестве фонового района с учетом однотипности рельефа и преобладающего направления ветра принята территория в районе оздоровительного комплекса «Училище Олимпийского резерва», расположенная в 14 км на юго-запад от г. Ангарска.

Оценка радиационной обстановки на местности проведена методом пешеходной гамма-съемки с измерением МАЭД (МКС-01А «Мультирад-М», Россия). Лабораторные исследования радионуклидного состава и удельной активности радионуклидов выполнены методами спектрометрии (гамма-спектрометр «CANBERRA» с полупроводниковым германиевым детектором, США) и радиометрии (радиометр УМФ-2000, Россия). Оценка содержания урана в пробах окружающей среды проводилась методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой ICP MS (Agilent 7500 sx).

Математическая обработка результатов проводилась посредством MS Excel 2016. В качестве показателя центральной тенденции использована медиана и границы её доверительного интервала при P=0,95 в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004³. В соответствии с принципом консервативности минимальные и максимальные значения, а также границы доверительного интервала медианы приведены с запасом на расширенную неопределённость измерений.

Радиационная обстановка

Значения МАЭД в районе расположения АО «АЭХК» представлены в таблице 1. Максимальные и медианные значения МАЭД в районе размещения шламоотстойников (сооружения 311, 325) варьируют в узком диапазоне 0,04–0,20 мкЗв/ч, не превышая значений в близлежащих населенных пунктах, и в целом соответствуют среднему значению по Байкальской природной территории 0,15 мкЗв/ч⁴.

Радиационная обстановка на территории сооружения 310 определяется спецификой проводимых работ (табл. 2). Вблизи освобожденных от грунта стен бетонных хранилищ значения МАЭД варьируют в пределах от 0,04

³ ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004. Статистические методы. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035332> (дата обращения: 10.07.2020) [GOST R ISO 16269-7-2004. Statistical methods. Statistical presentation of data. Median. Determination of point estimates and confidence intervals [Electronic resource] // CODE: electronic fund of legal and regulatory technical documentation. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200035332> (Accessed: 07/10/2020) (In Russ)].

⁴ О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. 684 с. [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University named after M.V. Lomonosova, 2022; 684 p. (In Russ)].

Таблица 1

Параметры радиационной обстановки в районе размещения АО «АЭХК»

[Table 1]

[For median values, the boundaries of their confidence intervals at P = 0.95 are indicated in parentheses]

Локации [Sites]	Количество измерений [Number of measurements]	МАЭД, мкЗв/ч [ADER, μ Sv/h]	
		Max	Медиана* [Median]
г. Ангарск [Angarsk]	3262	0,23	0,09 (0,06–0,12)
пос. Новый-4 [settlement New-4]	454	0,21	0,07 (0,05–0,10)
пос. Юго-Восточный [settlement Yugo-Vostochnyy]	564	0,19	0,08 (0,06–0,11)
СЗЗ АЭХК [SPZ of AECC]	1904	0,20	0,08 (0,05–0,10)
Сооружение 311 (карты I-VI) [311 structure (maps I-VI)]	2043	0,20	0,08 (0,05–0,11)
Сооружение 325 [325 structure]	1702	0,14	0,04 (0,02–0,05)
Фоновый район [Background area]	350	0,12	0,06 (0,04–0,08)

* Для медианных значений в скобках указаны границы их доверительных интервалов при P=0,95.
[Median values and the confidence interval boundaries, P=0,95].

Таблица 2

Параметры радиационной обстановки в ходе проведения работ по выводу из эксплуатации хранилища твердых радиоактивных отходов (сооружения 310)

[Table 2]

For median and geometric mean values, the boundaries of their confidence intervals at P = 0.95 are indicated in parentheses]

Год исследования [Year of study]	Мероприятия по выводу из эксплуатации сооружения 310 [Measures for decommissioning of 310 structure]	МАЭД, мкЗв/ч* [AEDR, μ Sv/h]			
		Min	Max	Медиана [Median]	Среднее геометрическое [Geometric mean]
1	2	4	5	6	7
Площадка сооружения 310 [Area of 310 structure]					
2021	До начала работ по выводу из эксплуатации [Before the decommissioning work]	0,04	0,37	0,07 (0,05–0,09)	0,07 (0,07–0,07)
2022	Снятие грунта с обвалованных хранилищ, извлечение РАО [Removal of soil from diked storage facilities, extraction of radioactive waste]	0,04	5,3	0,10 (0,07–0,14)	0,14 (0,13–0,15)
2023	Снятие грунта с обвалованных хранилищ, извлечение РАО [Removal of soil from diked storage facilities, extraction of radioactive waste]	0,04	4,1	0,13 (0,07–0,19)	0,23 (<0,1–1,2)
Технологические участки обращения с РАО на территории сооружений 310 [Technological areas for radioactive waste management on the territory of 310 structures]					
2022	Участок хранения грунта и стоянки техники [Soil storage and equipment parking area]	0,05	2,5	0,11 (0,07–0,16)	0,14 (0,13–0,16)
2022	Участок перетаривания и хранения контейнеризованных РАО (вне помещений) [Area for repacking and storage of containerized radioactive waste (outdoors)]	0,08	17	0,98 (0,5–1,5)	0,97 (0,7–1,3)
2023	Участок перетаривания и хранения контейнеризованных РАО (вне помещений) [Area for repacking and storage of containerized radioactive waste (outdoors)]	0,04	9,9	1,1 (0,4–3,5)	1,3 (0,5–3,7)

* Для медианных и средних геометрических значений в скобках указаны границы их доверительных интервалов при P=0,95.
[In parentheses – the limits of the confidence interval when P=0,95].

до 5,3 мкЗв/ч. Медианное значение соответствует показателю радиационной обстановки до начала проведения работ по вскрытию грунта на территории хранилищ. Для выполнения работ по выводу из эксплуатации на территории организованы участки кондиционирования РАО и временного хранения контейнеризованных РАО, где отмечено повышение значений МАЭД до контрольных уровней, установленных на период выполнения работ.

Удельная активность радионуклидов в почвогрунте

Результаты анализа проб поверхностного слоя почвогрунта на содержание техногенных и природных радионуклидов представлены в таблице 3. Удельная активность ²²⁶Ra и ²³²Th в поверхностном слое почвогрунтов в районе размещения сооружений 310 и 311 варьирует в диапазоне от 5 до 40 Бк/кг, соответствуя значениям в фоновом районе, медианные значения составляют 14 и 19 Бк/кг соответственно. Содержание техногенного ¹³⁷Cs в поверхностном слое не превышает 12 Бк/кг, находясь на уровне значений в фоновом районе. На глубине залегания основания бетонных сооружений, вскрытых в ходе работ по выводу из эксплуатации, обнаруживаются техногенные радионуклиды ²⁴¹Am (до 36 Бк/кг) и ¹⁵²Eu (0,7 Бк/кг), тогда как в поверхностном слое грунта на территории расположения сооружений радионуклидный состав определяется природными радионуклидами в концентрациях, не превышающих фоновых значений. В грунте отвалов сооружений 325 удельная активность природного ²²⁶Ra и ²³²Th

составляет 8 и 2 Бк/кг соответственно. Из техногенных радионуклидов отмечен ¹³⁷Cs активностью на уровне минимально детектируемой, что, в свою очередь, подтверждает радиационную безопасность отвалов фторгипса, используемого в качестве сырья для производства сухих строительных смесей [5, 6].

Оценка состояния загрязнения подземных вод

Определение качества подземных вод осуществляли в результате анализа проб воды наблюдательных скважин существующей сети по показателям суммарной альфа-активности и содержанию урана в весенне-осенний период года. В настоящее время на исследуемой территории эксплуатируются 11 скважин глубиной от 7 до 12 м (рис. 2).

В районах расположения хранилищ твердых РАО, фторгипса и шламоотстойников (I–IV карты) суммарная альфа-активность подземных вод варьирует в диапазоне от менее 0,025 до 0,15 Бк/кг, что не превышает критерия предварительной оценки качества воды по показателям радиационной безопасности, установленного для питьевой воды (НРБ-99/2009⁵). Установленный для питьевой воды критерий выбран в качестве реперного значения для мониторинга состояния загрязнения подземных вод. Наибольшие значения данного показателя наблюдаются в районе расположения обводненных шламоотстойников (V–VI карты) в весенний и осенний периоды года, максимальное значение составило 0,26±0,04 Бк/кг.

Содержание природных и техногенных радионуклидов в поверхностном слое почвогрунта (0–10 см)

Таблица 3

Content of natural and artificial radionuclides in the surface layer of soil (0–10 cm)

Table 3

Территория [Sites]	Удельная активность, Бк/кг* [Specific activity, Bq/kg]					Тип грунта [Soil type]
	²³² Th	²²⁶ Ra	¹³⁷ Cs	²³⁵ U	A _{эфф.} [A _{eff.}]	
Сооружение 310 [310 structure]	21 (14–27) 35	13 (10–18) 23	2 (<1–3) 10	1,4 (0,8–1,9) 3,6	114 (75–163) 172	Песчаник [sandstone]
Сооружение 311, карты I–IV [311 structure (maps I–VI)]	17 (5–40) 40	14 (6–27) 27	2 (<1–12) 12	1,8 (<0,9–2,3) 2,3	150 (103–199) 199	Песчаник, фторгипс [sandstone, fluorogypsum]
Сооружение 311, карты V–VI [311 structure (maps V–VI)]	19 (14–26) 26	15 (10–22) 22	1 (<1–3) 3	3,0 (2,7–3,3) 3,3	130 (117–144) 144	Песчаник с плодородным слоем [sandstone with fertile layer]
Сооружение 325 [325 structure]	2 (<1–3) 30	8 (4–16) 40	2 (<1–3) 3	0,5 (0,3–0,9) 2,3	20 (8–33) 159	Фторгипс [fluorogypsum]
Фоновый район [Background area]	21±2	17±2	5±2	1,7±0,3	170±35	Плодородный слой [fertile layer]
A _{ни}	–	–	100	–	–	

*Числитель – медиана (доверительный интервал), знаменатель – максимальное значение [The numerator is the median (confidence interval), the denominator is the maximum value].

⁵ 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 (далее – НРБ-99/2009). [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 (hereinafter – NRB-99/2009). (In Russ.)]

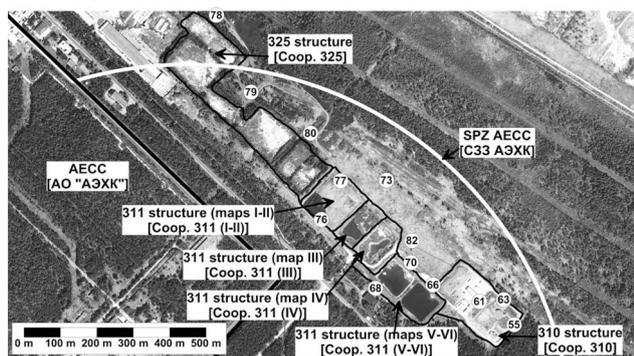


Рис. 2. Расположение наблюдательных скважин в районе расположения хранилищ отходов сублиматного производства АО «АЭХК»

[Fig. 2. The network of observation wells in the vicinity of waste storage facilities of JSC «АЕСС»]

Шламоотстойники являются потенциальным источником загрязнения подземных вод. При нарушении герметичности барьеров безопасности возможно дренирование осветленной пульпы через трещины/стыки стенок и дна хранилищ и взаимодействие с грунтовыми водами.

В целях мониторинга динамики распространения урана с подземными водами оценку его содержания определяли по концентрации металла в воде скважин наблюдательной сети. Результаты проведенных в 2022–2023 гг. исследований показали, что концентрация урана подвержена сезонным колебаниям в течение года и варьирует в широком диапазоне от $8 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ мг/л. При этом содержание металла более чем в 3 раза ниже гигиенического норматива для вод объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК – 0,015 мг/л) (СанПиН 1.2.3685-21⁶). В районе выводимых из эксплуатации хранилищ твердых РАО (сооружение 310) содержание урана находится на уровне фоновых показателей, характерных для подземных вод данной местности. Наибольшее содержание урана наблюдается в районе обводненных шламоотстойников (карты V–VI), превышение фона составляет 2–3 порядка (рис. 3А). В районе законсервированных шламоотстойников (карты I–IV) содержание урана снижается, в среднем составляя 0,002 мг/л с максимальным значением $0,004 \pm 0,002$ мг/л (рис. 3В). В районе отвалов фторгипса (сооружение 325) уровень содержания урана в целом соответствует фоновому, при этом отмечаются значения, отличающиеся от фона на 1–2 порядка в осенний и весенний периоды (рис. 3С).

Полученные данные согласуются с результатами предыдущих исследований и определяются особенностями миграции соединений урана в окружающей среде [1, 2]. Известно, что подвижность соединений урана в природных водах зависит от окислительно-восстановительного потенциала и кислотно-основных свойств водной среды [2]. Наибольшая мобильность соединений урана в водной среде определяется формированием условий, в которых уран находится в максимальной степени окисления

(+VI) в виде устойчивых комплексов с карбонат-ионом, образованию которых способствует щелочная среда. В работах Богуславского А.Е. и др. было показано, что химическая среда шламоотстойников способствует формированию благоприятных условий для миграции урана [2]. Окислительно-восстановительная среда шламоотстойников определяется парой нитрат/нитрит анионов, содержание которых превышает нормируемые показатели в воде в несколько раз. Это способствует поддержанию урана в максимальной степени окисления (+VI) и препятствует его переходу в восстановленную слабомигрирующую форму (+IV). Наряду с этим, в шламоотстойниках в значительных количествах присутствуют карбонаты и гидрокарбонаты, формирующие щелочную среду и образующие прочные комплексы с ураном (VI). Учитывая тот факт, что отходы сублиматного производства расположены в проницаемом песчаном грунте, неизбежно их взаимодействие с метеорными и грунтовыми водами. Подтверждением этого факта является наблюдаемая повышенная основность, обусловленная повышенным содержанием гидрокарбонатов (pH=9), и измененный ионный состав подземных вод в районе шламоотстойников [2].

Заключение

Радиационно-гигиеническая обстановка в районе расположения выводимого из эксплуатации комплекса хранилищ твердых РАО в целом характеризуется фоновыми уровнями, соответствующими региональным показателям по Иркутской области. На территории выводимого из эксплуатации комплекса имеются локальные участки обращения с РАО (производственные участки выгрузки и кондиционирования РАО), где МАЭД достигает установленных контрольных уровней на период проведения работ. В почвогрунте у основания выводимых из эксплуатации хранилищ РАО (сооружение 310) присутствуют техногенные радионуклиды ^{241}Am и ^{152}Eu в концентрациях, не превышающих критерия неограниченного использования. Подземные воды наблюдательных скважин в районе сооружения 310 в целом соответствуют нормируемым показателям радиационной безопасности вод объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования и характеризуются близкими к фоновым значениям концентрации урана.

Законсервированные хранилища жидких технологических отходов сублиматного производства (сооружение 311, карты I–VI) остаются потенциальным источником загрязнения подземных вод ураном. Химический состав пульпы и слоя донных отложений шламоотстойников, с учетом особенности вмещающих грунтов, формируют условия, определяющие повышенную миграционную активность соединений урана в подземные воды. Максимальные концентрации урана, обнаруженные в районе обводненных карт шламоотстойников (карты V–VI), не превышают ПДК, при этом выше фоновых значений на два порядка и более. По результатам проведенных исследований предложены ре-

⁶ Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Sanitary rules and norms SanPIN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans (In Russ.)]

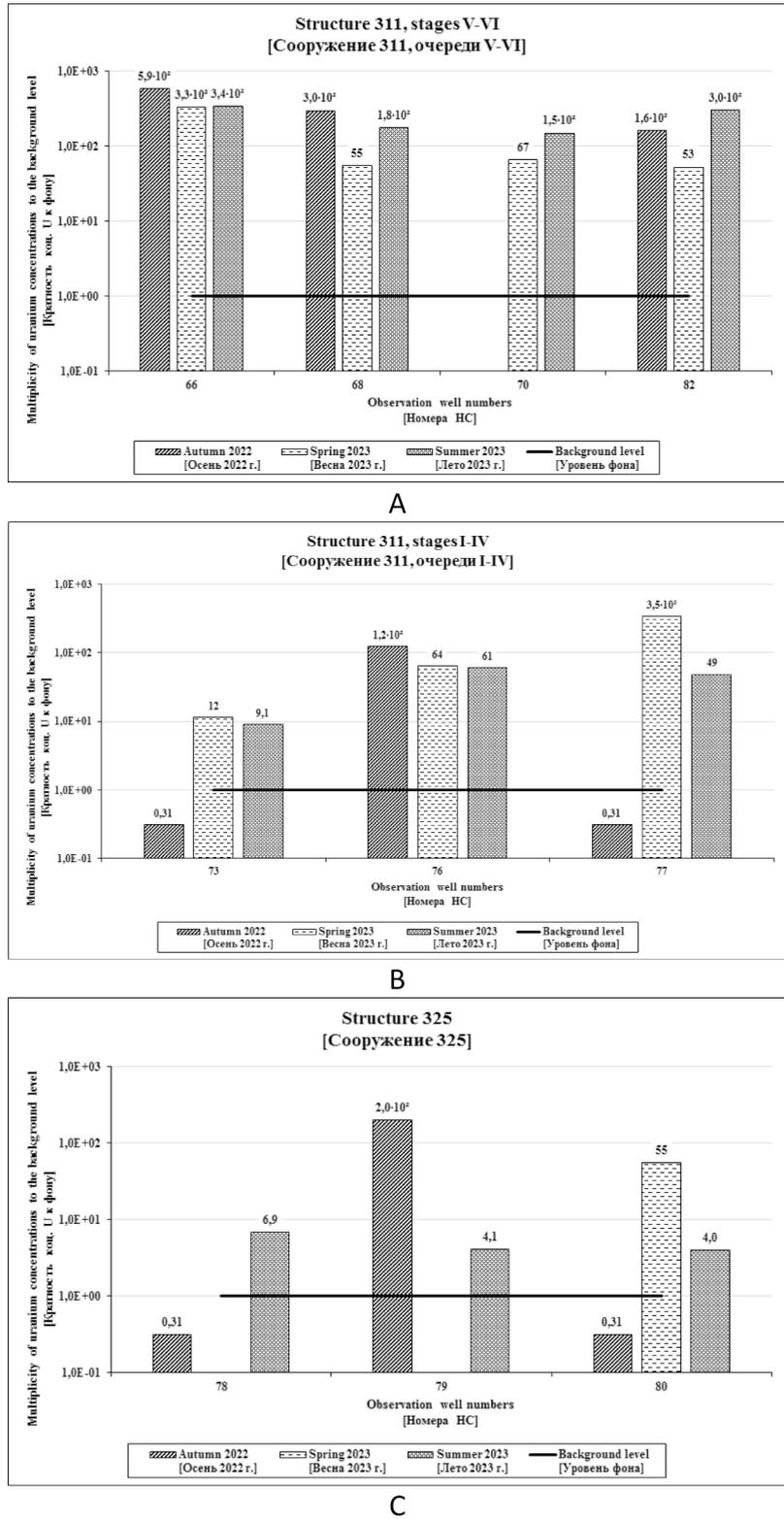


Рис. 3. Распределения урана в подземных водах в районе расположения хранилищ сублиматного производства АО «АЭХК» (А – карты V–VI сооружения 311, В – карты I–IV сооружения 311, С – сооружение 325)
[Fig.3. Distribution of uranium in groundwater in the area where the sublimation production storage facilities of JSC “AECC” are located (A – st. V-VI str. 311, B – st. I-IV str. 311, C – str.325)]

ференсные уровни содержания урана для дальнейшего наблюдения за состоянием подземных вод до принятия практических решений о выводе законсервированных шламоотстойников из зоны активного водообмена и их рекультивации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Зозуль Ю.Н. – сбор материала и анализ данных, написание текста.

Киселёв С.М. – концепция и дизайн исследования, сбор и анализ данных, написание текста.

Шлыгин В.В. – сбор материала и обработка данных, написание текста.

Ахромеев С.В. – сбор материала и обработка данных, редактирование.

Малахова А.Н. – анализ литературного материала, проведение измерений проб.

Гимадова Т.И. – проведение измерений проб, статистическая обработка данных.

Бельских Ю.С. – проведение измерений проб.

Арчакова Ю.В. – редактирование текста.

Галицкая Л.Н. – сбор материала, проведение измерений проб.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Шемелина О.В. Закономерности миграции урана в низкорадиоактивных хранилищах отходов (на примере АО АЭХК). Специальность 25.00.09. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых: дисс... канд. геол.-минерал. наук. Новосибирск, 2019. 154 с.
2. Богуславский А.Е., Гаскова О.Л., Шемелина О.В. Миграция урана в грунтовых водах района шламохранилищ Ангарского электролизного химического комбината // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, вып. 5. С. 515-529. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18226767> (Дата обращения: 10.09.2023).
3. Материалы по оценке воздействия на окружающую среду «Вывод их эксплуатации хранилища сооружения 310 АО «АЭХК». Ангарск, 2014.
4. Рабочий проект консервации шламоотстойников (сооружения 3113-4) химического завода ФГУП «АЭХК». ФГУП НГПИИ «ВНИПИЭТ». Заказ 0308.А. Инв. № 92996 пф. Новосибирск, 2004.
5. Кузьмин М.П., Ларионов Л.М., Кузьмина М.Ю., Григорьев В.Г. Промышленное использование фторгипса – отхода производства плавиковой кислоты // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9, № 2. С. 324–333. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-324-333.
6. Отчет по экологической безопасности АО «АЭХК» за 2020. Ангарск, 2021. 33 с. URL: <http://www.aecc.ru/attachments/article/1268/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%BB.%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20%D0%90%D0%AD%D0%A5%D0%9A%202020.pdf> (Дата обращения: 10.09.2023)

Поступила: 30.10.2023 г.

Зозуль Юлия Николаевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 123098, Москва, ул. Живописная, 46; E-mail: julnik@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3154-1806>

Киселев Сергей Михайлович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией регулирующего надзора за объектами ядерного наследия, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2613-2293>

Шлыгин Владимир Васильевич – младший научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1190-9557>

Ахромеев Сергей Викторович – научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6564-3045>

Малахова Анна Николаевна – младший научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3868-3671>

Гимадова Тамара Ивановна – старший научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9144-2610>

Бельских Юрий Сергеевич – научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6013-6610>

Арчакова Юлия Владимировна – главный врач, Центр гигиены и эпидемиологии № 28 Федерального медико-биологического агентства России, Ангарск, Россия

Галицкая Любовь Николаевна – заведующая лабораторией – химик-эксперт, Центр гигиены и эпидемиологии № 28 Федерального медико-биологического агентства России, Ангарск, Россия

Для цитирования: Зозуль Ю.Н., Киселёв С.М., Шлыгин В.В., Ахромеев С.В., Малахова А.Н., Гимадова Т.И., Бельских Ю.С., Арчакова Ю.В., Галицкая Л.Н. Радиационно-гигиеническая обстановка в районе размещения хранилищ отходов сублиматного производства АО «АЭХК» // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 111-120. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-111-120

Radiation-hygienic situation in the area of sublimate production waste storage of JSC “AECC”

Yuliya N. Zozul¹, Sergey M. Kiselev¹, Vladimir V. Shlygin¹, Sergey V. Akhromeev¹, Anna N. Malakhova¹, Tamara I. Gimadova¹, Yuriy S. Belskikh¹, Yuliya V. Archakova², Lyubov N. Galitskaya²

¹State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

²Center of Hygiene and Epidemiology No. 28 of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Angarsk, Russia

In accordance with the fundamentals of state policy in the field of ensuring nuclear and radiation safety, State Corporation «Rosatom» carries out the remediation of JSC “AECC” nuclear legacy sites. The article presents the results of environmental impact assessment carried out in 2021–2023 in the vicinity of sublimation waste storage facilities that are being decommissioned. Health physics studies involved ambient dose rate measurements, sampling (soil, groundwater) and analysis of radiological and non radiological environmental pollutants. The external gamma dose rate, as well as content of natural and artificial radionuclides in soil, don't exceed background levels. While uranium presence in groundwater is found to be 10 times and higher than background level. The data obtained indicate that the accumulated wastes of sludge sumps (bottom sediments, pulp) come into contact with natural water. Flooded storage facilities form a plume of contamination spreading out in the direction of groundwater flow. Given the current situation optimization of the existing environmental monitoring programs in the JSC “AECC” health protection zone is recommended and reference levels of uranium proposed.

Key words: environmental monitoring, decommissioning, uranium, groundwater, waste, sublimate production

Authors' personal contribution

Zozul Yu.N. – collecting material and analyzing data, writing text;

Kiselev S.M. – concept and design of the study, data collection and analysis, text writing;

Shlygin V.V. – collecting material and processing data, writing text;

Akhromeev S.V. – collection of material and data processing, editing;

Malakhova A.N. – analysis of literary material, carrying out sample measurements;

Gimadova T.I. – carrying out sample measurements, statistical data processing;

Belskikh Yu.S. – carrying out sample measurements;

Archakova Yu.V. – text editing;

Galitskaya L.N. – collecting material, conducting sample measurements.

All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The study was not sponsored.

Yuliya N. Zozul

State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center

Address for correspondence: Zhivopisnaya str., 46, Moscow, 123098, Russia; E-mail: julnik@list.ru

References

1. Shemelina OV. Patterns of uranium migration in low-level radioactive waste storage facilities (using the example of JSC AECC). Speciality 25.00.09. Geochemistry, geochemical methods for searching for minerals. Dissertation for the scientific degree of candidate of geological and mineralogical sciences. Novosibirsk;2019. 154 p. (In Russian).
2. Boguslavsky AE, Gaskova OL, Shemelina OV. Migration of uranium in groundwater in the area of sludge storage facilities of the Angarsk electrolysis chemical plant. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for sustainable development*. 2012;20(5): 515-529. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18226767> (Accessed 10.09.2023). (In Russian).
3. Materials on environmental impact assessment "Decommissioning of the storage facility of facility 310 of JSC AECC". Angarsk; 2014. (In Russian).
4. Working draft for the conservation of sludge settling tanks (structures 311 3-4) of the chemical plant of the Federal State Unitary Enterprise AECC. FSUE NGPII "VNIPIET". Order 0308.A. Inv. No. 92996 pf. Novosibirsk; 2004. (In Russian).
5. Kuzmin MP, Larionov LM, Kuzmina MYu, Grigoriev VG. Industrial use of fluorogypsum, a waste product from hydrofluoric acid production. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroite'stvo. Nedvizhimost = News from universities. Investments. Construction. Real estate*. 2019;9(2): 324-333. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-324-333. (In Russian).
6. Environmental safety report of JSC "AECC" for 2020. Angarsk. 2021. 33 p. Available from: <http://www.aecc.ru/attachments/article/1268/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%BB.%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20%D0%90%D0%AD%D0%A5%D0%9A%202020.pdf> (Accessed 10.09.2023). (In Russian).

Received: October 30, 2023

For correspondence: Yuliya N. Zozul – Ph.D Biological Sciences, Leading Researcher of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia (Zhivopisnaya str., 46, Moscow, 123098, Russia; E-mail: julnik@list.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3154-1806>

Sergey M. Kiselev – Ph.D Biological Sciences, Head of the Laboratory of Regulatory Supervision of Nuclear Legacy Sites of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2613-2293>

Vladimir V. Shlygin – Junior Researcher of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1190-9557>

Sergey V. Akhromeev – Researcher of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6564-3045>

Anna N. Malakhova – Junior Researcher of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3868-3671>

Tamara I. Gimadova – Senior Researcher of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9144-2610>

Yuriy S. Belskikh – Researcher of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6013-6610>

Yuliya V. Archakova – Chief Physician of the Center of Hygiene and Epidemiology No. 28 of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Angarsk, Russia

Lyubov N. Galitskaya – Head of the laboratory – expert chemist of the Center of Hygiene and Epidemiology No. 28 of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Angarsk, Russia

For citation: Zozul Yu.N., Kiselev S.M., Shlygin V.V., Akhromeev S.V., Malakhova A.N., Gimadova T.I., Belskikh Yu.S., Archakova Yu.V., Galitskaya L.N. Radiation-hygienic situation in the area of sublimate production waste storage of JSC "AECC". *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 111-120. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-111-120

Современное радиационно-гигиеническое состояние территорий проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-4» и «Горизонт-1» в Республике Коми

А.М. Библин¹, К.В. Варфоломеева¹, К.А. Седнев¹, С.А. Иванов¹, В.С. Репин¹, А.Г. Георгиева²

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

² Территориальный отдел Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Коми в г. Усинск, Усинск, Россия

В статье представлены результаты исследования радиационной обстановки территорий, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-4» и «Горизонт-1» в Республике Коми. Полевые работы были проведены в июле 2021 г. В работе дана оценка радиационной обстановки по основным показателям: значения мощности амбиентного эквивалента дозы, содержание природных и техногенных радионуклидов в почве, трития в воде открытых водоемов и источниках питьевого водоснабжения в ближайших к местам проведения мирных ядерных взрывов населенных пунктах. Значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на всех обследованных территориях находятся на уровне колебаний естественного регионального радиационного фона и составили на территории мирного ядерного взрыва «Глобус-4» – 0,03–0,07 мкЗв/ч, «Горизонт-1» – 0,01–0,05 мкЗв/ч. Участки загрязнения почвы техногенными радионуклидами не выявлены. Удельная активность трития в пробах воды не превышает 5 Бк/кг, что характерно для глобальных уровней содержания данного радионуклида в водных объектах. Исследование показало, что радиационная обстановка на территории мирных ядерных взрывов «Глобус-4» и «Горизонт-1» соответствует требованиям СанПиН 2.6.1.2819–10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» и в настоящее время не представляет угрозы здоровью населения. Консервативная оценка дозы дополнительного техногенного облучения отдельных лиц из населения от поступления трития с водой из источников централизованного водоснабжения составила 0,065 мкЗв/год. Долговременное обеспечение радиационной безопасности исследованных территорий требует организации радиационного мониторинга, определения границ охранных зон и установки читаемых информационных знаков, предупреждающих о радиационной опасности и запрете хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: мирные ядерные взрывы, тритий, Республика Коми, Воркута, радионуклиды, радиоактивное загрязнение, радиационная безопасность, радиационная обстановка, тритий (H-3).

Введение

Актуальность периодической оценки радиационной обстановки районов проведения мирных ядерных взрывов (МЯВ) обусловлена потенциальной опасностью выхода техногенных радионуклидов из центральной зоны взрыва на поверхность в результате вертикальной миграции, вызванной нарушением почвенного покрова вследствие бурения, а также возможными разрушениями забетонированных затрубных пространств боевых и исследовательских скважин.

В последнее десятилетие опубликован целый ряд научных статей с результатами радиационного обследования отдельных МЯВ [1–8]. Большинство из проведенных

исследований выполнено в рамках федеральных целевых программ «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности» [1–6].

Сотрудниками ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева при участии Управления Роспотребнадзора по Республике Коми в июле 2021 г. было проведено радиационно-гигиеническое обследование территорий, прилегающих к местам проведения МЯВ на территории городского округа (далее г.о.) Воркута.

Цель исследования – дать радиационно-гигиеническую оценку состояния мест проведения МЯВ, расположенных на территории г.о. Воркута в Республике Коми.

Библин Артём Михайлович

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

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

Материалы и методы

На территории Республики Коми в период с 1971 по 1984 г. с целью сейсмондирования земной коры было осуществлено четыре МЯВ [8-10], два из которых (Горизонт-1 и Глобус-4) были проведены на территории г.о. Воркута. Схема расположения МЯВ на территории Республики Коми приведена на рисунке 1.

МЯВ «Глобус-4» был проведен 02.07.1971 г., мощность заряда составляла 2,3 кт тротилового эквивалента, глубина закладки заряда – 542 м [9]. Технологическая скважина расположена в 10 км на восток от железнодорожной станции (ж.д. ст.) Хановой, в 30 км на юго-запад от г. Воркута и в 100 м от берега реки Лёк-Воркута. Территория проведения МЯВ «Глобус-4» находится в относительно легкодоступном районе г.о. Воркута в непосредственной близости от традиционных маршрутов рыбаков, охотников и туристов.

МЯВ «Горизонт-1» был проведен 29.04.1974 г., мощность заряда составляла 7,6 кт тротилового эквивалента, глубина закладки заряда 583 м [9]. Территория МЯВ относительно труднодоступна, расположена на горе Седьяхамыльк в 70 км юго-западнее г. Воркуты и в 20 км на восток от железнодорожной станции Сейда.

Оба взрыва не являются аварийными, в то же время в работе В.В. Ершова [8] отмечается, что, согласно результатам исследований Воркутинской геолого-поисковой экспедиции в период с 1974 по 1977 г., водоносные горизонты, расположенные в радиусе 70 м от технологической скважины, содержали тритий (^3H), стронций и цезий (значения удельной активности радионуклидов в ста-

тье отсутствуют, так же как и не приведены их сравнения с глобальными уровнями).

Схема расположения МЯВ «Горизонт-1» и «Глобус-4» приведена на рисунке 2.

Радиационное обследование районов проведения МЯВ проводилось по традиционной схеме [7, 10, 15], которая включала в себя определение географических координат специфических элементов ландшафта, точек измерений и отбора проб с использованием спутниковых навигаторов, измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД), идентификацию гамма-излучающих радионуклидов *in situ* методом полевой гамма-спектрометрии, отбор проб верхнего (на глубину до 20 см) слоя почвы, а также проб воды на содержание трития, фотосъемку.

Измерение МАЭД выполнялось на высоте 1 м от поверхности почвы с помощью спектрометра МКГ-АТ1321 (производство фирмы АТОМТЕХ, Беларусь). Точки измерений МАЭД на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ «Глобус-4» (153 точки) и «Горизонт-1» (131 точка), представлены на рисунках 3 и 4.

Идентификация гамма-излучающих радионуклидов на местности проводилась с помощью сцинтилляционного переносного спектрометра МКСП-01 (производство фирмы «РАДЭК», Россия) со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) $\varnothing 80 \times 80$ мм (диапазон регистрируемых энергий от 100 кэВ до 3 МэВ; энергетическое разрешение по линии гамма-излучения радионуклида ^{137}Cs с энергией 661,6 кэВ не превышает 9,5%) (экспозиция не менее 30 мин) [8, 15]. Точки проведения гамма-спектрометриче-

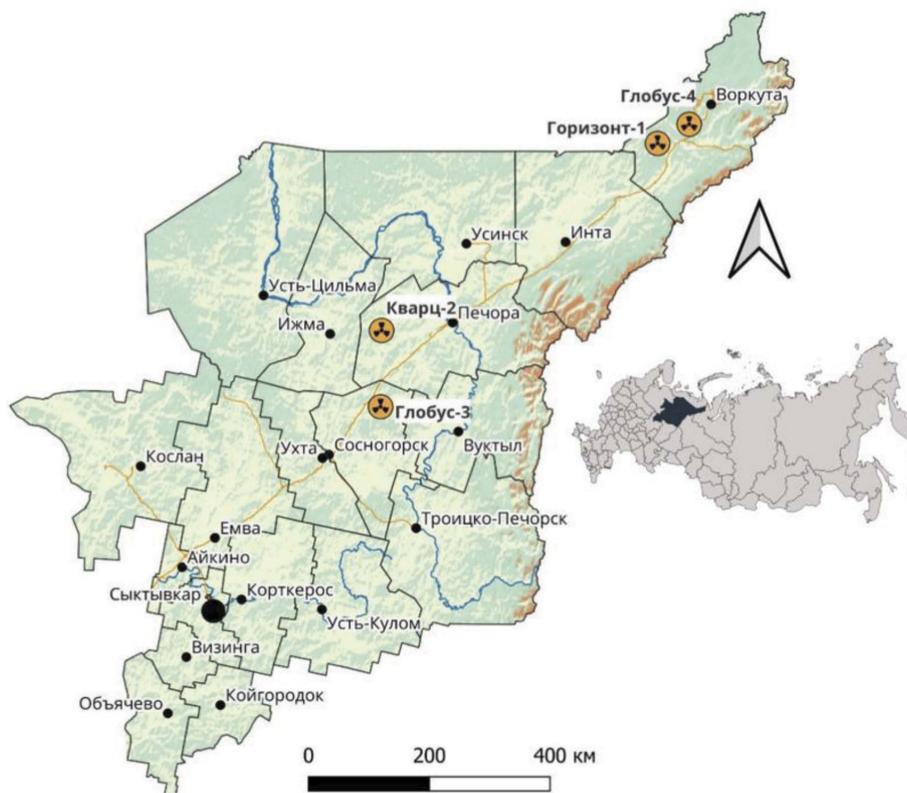


Рис. 1. Карта-схема расположения мест проведения МЯВ на территории Республики Коми в Российской Федерации.

[Fig. 1. Map-scheme of locations of peaceful nuclear explosion (PNE) sites on the territory of the Komi Republic in the Russian Federation]

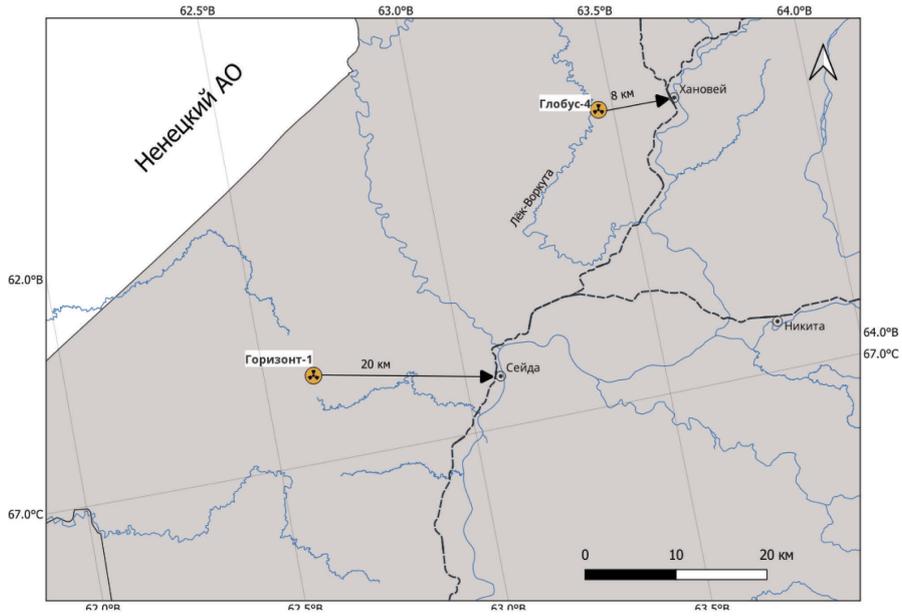


Рис. 2. Карта-схема расположения мирных ядерных взрывов «Горизонт-1» и «Глобус-4»
 [Fig. 2. Map-scheme of Location scheme of the “Gorizont-1” and “Globus-4” PNE]



Рис. 3. Точки измерений МАЭД на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Глобус-4»
 [Fig.3. Locations of ADER measurement points on the territory of the PNE “Globus-4”]

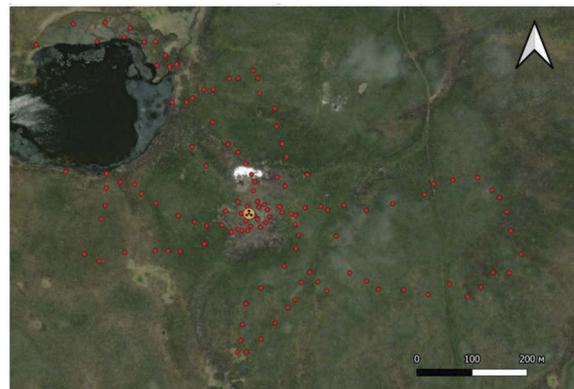


Рис. 4. Точки измерений МАЭД на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Горизонт-1»
 [Fig.4. Locations of ADER measurement points on the territory of the PNE “Gorizont-1”]

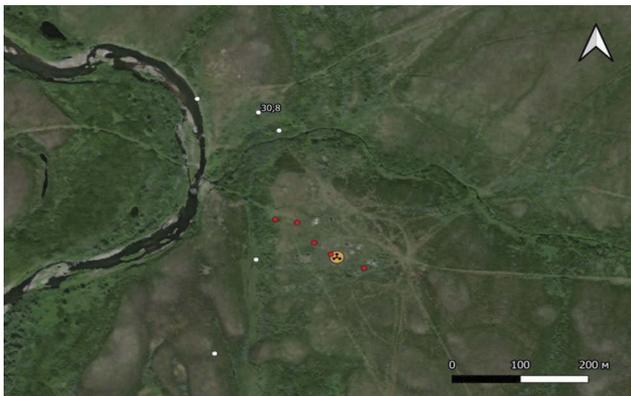


Рис. 5. Точки проведения гамма-спектрометрических исследований и отбора проб почвы (красные точки), а также проб воды на тритий (белые точки) на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Глобус-4»
 [Fig. 5. Sites of gamma spectrometric measurements and soil sampling points (red dots) and water sampling for tritium (white dots) on the territory of the PNE “ Globus-4”]



Рис. 6. Точки проведения гамма-спектрометрических исследований и отбора проб почвы (красные точки), а также проб воды на тритий (белые точки) на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Горизонт-1»
 [Fig. 6. Sites of gamma spectrometric measurements and soil sampling points (red dots) and water sampling for tritium (white dots) on the territory of the PNE “Gorizont-1”]

ских измерений МЯВ «Глобус-4» (5 точек) и «Горизонт-1» (5 точек) представлены на рисунках 5 и 6.

Лабораторные измерения удельной активности радионуклидов в почве проводились в геометрии «Маринелли» объемом 1 дм³ на гамма-спектрометрической установке МКСП-01 (производство фирмы «РАДЭК», Россия) со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) 80×80 мм при времени экспозиция 2–3 ч. Обработка гамма-спектрометров проводилась методом, представленным в статье [12].

Определение удельной активности трития в воде в счетных образцах выполнено в соответствии с методикой выполнения измерений активности альфа-, бета-излучающих радионуклидов в жидких и твердых пробах с использованием радиометра альфа-, бета-излучения спектрометрического «Quantulus-1220» во ФБУН научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева фирмы «PerkinElmer» (Свидетельство об аттестации методики № 45014.15225/RA.RU.311243 от 11 декабря 2015 г.). При продолжительности измерений проб не менее 720 минут методика обеспечивает определение минимально детектируемой удельной активности радионуклидов с нижним пределом около 1 Бк/кг.

Точки отбора проб воды на определение содержания трития на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ «Глобус-4» (5 проб) и «Горизонт-1» (6 проб), представлены на рисунках 5 и 6.

Дополнительные пробы на тритий отбирались из источников питьевого водоснабжения в близлежащих к МЯВ населённых пунктах: 4 пробы было отобрано в г. Воркута, 4 – в п.г.т. Заполярный, по 1 пробе – в п. Сейда и п. Хановей.

Визуализация расположения точек измерений и отбора проб, а также зафиксированных особенностей ландшафта на исследованных территориях для наглядности выполнена с использованием геоинформационной системы QGIS 3.28.

Доза внутреннего облучения представительного индивидуума за счет поступления ³H с питьевой водой в населенном пункте ($E_{\text{вода_нп}}$) рассчитывалась по формуле:

$$E_{\text{вода_нп}} = m_{\text{вода}} \cdot A_i^{H3} \cdot \epsilon_{H3},$$

где:

A_i^{H3} – максимальная удельная активность ³H в воде из i -го источника питьевого водоснабжения в населенном пункте; ϵ_{H3} – дозовый коэффициент при поступлении ³H с питьевой водой в организм взрослого человека, который в соответствии с НРБ-99/2009 равен $1,8 \cdot 10^{-5}$ мкЗв/Бк; $m_{\text{вода}}$ – годовое потребление воды, принятое в соответствии с НРБ-99/2009 равным 730 кг/год.

Результаты и обсуждение

Краткая характеристика санитарного состояния территорий МЯВ, проведенных в г.о. Воркута Республики Коми

«Глобус-4»

В месте проведения МЯВ «Глобус-4» имеется оголовок технологической скважины, представляющий собой металлический постамент, расположенный на песчано-гравийной насыпи. Репер над устьем боевой скважины представляет собой круглый металлический знак, расположенный на металлической трубе, наклоненной под углом 45° над поверхностью земли (рис. 7а). Территория частично захламлена металлическими конструкциями, контейнерами, бочками, трубами и т.д.



a



b

Рис. 7. Фотографии технологических скважин МЯВ «Глобус-4» (а) и «Горизонт-1» (б)
[Fig. 7. Technological boreholes of PNE “Globus-4” (a) and “Gorizont-1” (b)]

«Горизонт-1»

Устье боевой скважины в месте проведения МЯВ «Горизонт-1» оборудовано металлическим постаментом с бетонным усилением. Репер представляет собой металлическую трубу с круглым металлическим знаком с наваренным на нем текстом, запрещающим производство строительных и буровых работ в радиусе 450 м (рис. 7b). Текст плохо читаемый, часть наваренных букв отсутствует. Для территории также характерно частичное захламление металлическими трубами, бочками, проволокой и другими некрупными объектами.

Результаты изучения основных показателей, характеризующих радиационно-гигиеническое состояние территорий МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1»

Результаты измерений МАЭД, зафиксированных в районе проведения МЯВ «Глобус-4», находились в диапазоне от 0,03 до 0,07 мкЗв/ч (среднее значение составило 0,05; стандартное отклонение 0,01 мкЗв/ч).

Результаты измерений МАЭД, зафиксированных в районе проведения МЯВ «Горизонт-1», находились в диапазоне от 0,01 до 0,05 мкЗв/ч (среднее значение составляло 0,04; стандартное отклонение 0,01 мкЗв/ч).

Наиболее высокие значения МАЭД были зафиксированы в местах отсыпки территории щебнем, наименьшие – в болотистых низинах.

Результаты анализа полевых спектров и почвы показали, что на территории МЯВ «Горизонт-1» и «Глобус-4» отсутствуют участки локального загрязнения техногенными радионуклидами. Расшифровка полевых спектров приведена в таблице 1.

Типичные спектры, полученные в районах проведения МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1», показаны на рисунках 8 и 9 соответственно.

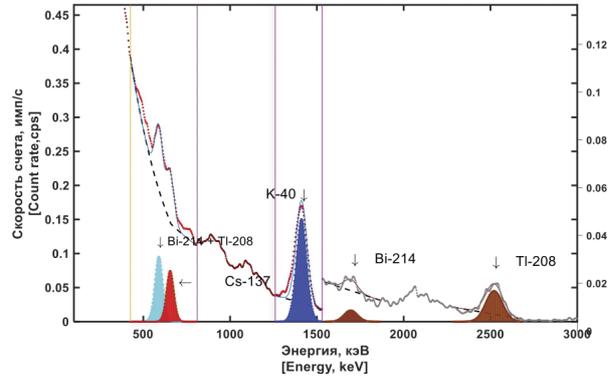


Рис. 8. Гамма-спектр-5, измеренный in situ на площадке в месте размещения лагеря экспедиции на объекте «Глобус-4» [Fig. 8. Spectrum-5 measured at the location of the expedition camp at the “Globus-4” PNE site]

Результаты измерений интенсивности пиков полного поглощения ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²¹⁴Bi и ²⁰⁸Tl в спектрах полевой гамма-спектрометрии на территориях МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1»

Таблица 1

Results of measurements of the intensity of peaks of full absorption of ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²¹⁴Bi and ²⁰⁸Tl in the spectra of field gamma spectrometry on the territories of the PNE «Globus-4» and «Gorizont-1»

[Table 1]

Код спектра [Code Spectrum]	Координаты, градусы [Coordinates, degrees]	Интенсивность счета под пиком, имп/с (+/- ошибка) [Intensity of the counts under peak, cps (+/- error)]			
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²¹⁴ Bi	²⁰⁸ Tl
МЯВ «Глобус-4» [PNE Globus-4]					
Спектр-1 [Spectrum-1]	N 67.28496 E 63.46128	1,38 (0,10)	3,29 (0,16)	2,47 (0,13)	0,22 (0,26)
Спектр-2 [Spectrum-2]	N 67.28514 E 63.46072	0,92 (0,11)	1,58 (0,14)	2,59 (0,12)	0,15 (0,06)
Спектр-3 [Spectrum-3]	N 67.28545 E 63.46014	0,68 (0,09)	1,94 (0,16)	4,08 (0,12)	–
Спектр-4 [Spectrum-4]	N 67.28475 E 63.46241	1,37 (0,13)	1,73 (0,15)	3,79 (0,12)	0,16 (0,12)
Спектр-5 [Spectrum-5]	N 67.28550 E 63.45939	0,58 (0,09)	1,49 (0,14)	3,21 (0,12)	0,17 (0,06)
МЯВ «Горизонт-1» [PNE Gorizont-1]					
Спектр-7 [Spectrum-7]	N 67.08523 E 62.62335	–	2,11 (0,15)	4,06 (0,14)	0,19 (0,14)
Спектр-8 [Spectrum-8]	N 67.08532 E 62.62407	0,39 (0,06)	2,28 (0,17)	4,12 (0,14)	0,21 (0,12)
Спектр-9 [Spectrum-9]	N 67.08567 E 62.62343	0,51 (0,09)	1,46 (0,14)	1,77 (0,10)	0,25 (0,04)
Спектр-10 [Spectrum-10]	N 67.08508 E 62.62313	0,47 (0,08)	2,25 (0,17)	3,84 (0,13)	0,18 (0,15)
Спектр-11 [Spectrum-11]	N 67.08504 E 62.62289	1,38 (0,10)	3,29 (0,16)	2,47 (0,13)	0,22 (0,26)

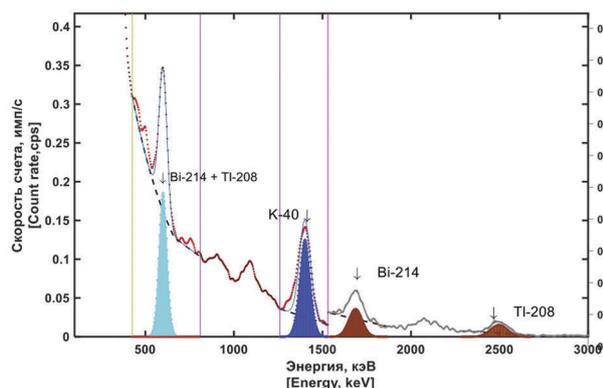


Рис. 9. Гамма-спектр-11, измеренный in situ на площадке в месте размещения лагеря экспедиции на объекте «Горизонт-1»

[Fig. 9. Spectrum-11 measured at the location of the expedition camp at the «Gorizont-1» PNE site]

В первом случае (объект «Глобус-4») выявлен небольшой пик ^{137}Cs , характерный для уровня глобального загрязнения целинных участков почвы. Во втором случае (объект «Горизонт-1») пик ^{137}Cs не выявлен, что может

быть связано с перекопкой или засыпкой верхнего целинного слоя почвы. Результаты лабораторных исследований удельной активности радионуклидов в пробах почвы, отобранных на территориях проведения МЯВ, представлены в таблице 2.

Измеренные величины удельной активности радионуклидов во всех исследованных пробах почвы находятся на уровне фоновых значений и не превышают критерий неограниченного использования твердых материалов (по показателю радиационной безопасности), установленный ОСПОРБ-99/2010, – 100 Бк/кг для ^{137}Cs , 1000 Бк/кг для ^{226}Ra , 100 Бк/кг для ^{232}Th и 10 000 Бк/кг для ^{40}K

Результаты лабораторных исследований содержания трития (^3H) в пробах воды из водных объектов в районах проведения МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1» представлены в таблице 3.

Во всех пробах воды из источников питьевого водоснабжения в населенных пунктах, расположенных в районах проведения обследованных МЯВ, концентрации ^3H находились в пределах колебаний уровней глобального загрязнения (<5 Бк/кг) и на порядки ниже уровня вмешательства для трития в питьевой воде (7600 Бк/кг – приложение 2а к НРБ-99/2009).

Таблица 2

Удельная активность природных и техногенных радионуклидов в пробах почвы в районах проведения МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1»

[Table 2

Specific activity of natural and anthropogenic radionuclides in soil samples collected in the protected zones of PNE «Globus-4» and «Gorizont-1»]

Место отбора [Sampling location]	Удельная активность, Бк/кг [Specific activity, Bq/kg]			
	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
МЯВ «Глобус-4» [PNE Globus-4]				
Спектр-1 [Spectrum-1]	<2	321±40	22±5	24±4
Спектр-2 [Spectrum-2]	3±1	274±47	37±7	59±6
Спектр-3 [Spectrum-3]	<2	383±44	26±5	26±4
Спектр-4 [Spectrum-4]	<2	426±46	33±5	27±4
Спектр-5 [Spectrum-5]	<2	437±46	26±5	30±4
МЯВ «Горизонт-1» [PNE Gorizont-1]				
Спектр-7 [Spectrum-7]	<2	399±48	27±6	28±5
Спектр-8 [Spectrum-8]	<2	422±46	28±5	26±4
Спектр-9 [Spectrum-9]	<2	432±49	27±6	30±5
Спектр-10 [Spectrum-10]	<2	414±49	22±6	28±5
Спектр-11 [Spectrum-11]	<2	431±54	33±7	30±5

Таблица 3

Удельная активность ^3H в пробах воды из водных объектов в районах проведения МЯВ в Республике Коми, Бк/кг

[Table 3

Activity concentration of ^3H in water samples from water bodies in the areas of PNE in the Komi Republic in 2021]

Название МЯВ [PNE Name]	Количество проб, шт. [Number of samples]	Удельная активность ^3H , Бк/кг [^3H volume activity, Bq/kg]		
		Минимум [Min]	Максимум [Max]	Среднее значение [Average]
«Глобус-4» [«Globus-4»]	5	1,18±0,73	3,27±0,83	2,19
«Горизонт-1» [«Gorizont-1»]	6	2,49±0,84	5,34±1,08	4,18

В пробах, отобранных из источников питьевого водоснабжения в ближайших к МЯВ населенных пунктах, удельная активность ^3H находилась в диапазоне от 3,38 до 4,91 Бк/кг, что соответствует региональным значениям.

Доза внутреннего облучения представительного индивида за счет поступления ^3H с объемной активностью 4,91 Бк/кг, рассчитанная по формуле 1, составляет 0,065 мкЗв/год.

Собственные результаты исследования радиационной обстановки на территории МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1» согласуются с литературными данными. По данным Ершова В.В. и результатам исследований, проведенных ФГУП «ВНИПИпромтехнологии» в 2008 г., параметры радиационной обстановки в районе проведения МЯВ «Глобус-4» соответствовали естественному радиационному фону, характерному для данного региона [8]. В то же время в работе [8] отмечается, что в одной пробе воды выявлена удельная активность ^{90}Sr , равная 0,68 Бк/дм³, что двукратно превышает фон 0,30 Бк/дм³.

В 2013 г. комиссия в составе представителей Управления Роспотребнадзора по Республике Коми и ОАО «ВНИПИпромтехнологии» провела комплексное техническое и радиоэкологическое обследование МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1». Обследование не выявило каких-либо отклонений от типичных показателей, характерных для региона [11].

Заключение

Результаты исследований показали, что радиационная обстановка на территории МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1» на момент исследования соответствовала требованиям СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях». Участки загрязнения техногенными радионуклидами не выявлены. Уровни содержания трития в пробах воды, отобранных на территориях проведения МЯВ и в прилегающих населенных пунктах, находятся в пределах, характерных для Российской Федерации.

Обращает на себя внимание неудовлетворительное санитарное состояние прилегающих к местам проведения МЯВ обследованных территорий: имеются заржавевшее технологическое оборудование, бочки, технологический мусор; устья боевых скважин окружены зарослями деревьев и кустарника и, следовательно, подвержены пожарной опасности; информационные знаки, установленные на полуразрушенных бетонных основаниях, расположенных на устьях боевых скважин обследованных МЯВ, имеют едва различимые надписи, в месте проведения взрыва «Глобус-4» информационный знак сломан.

Материалы, представленные в данной статье, могут служить основой для сравнительного анализа результатов при организации такого мониторинга в будущем.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Библин А.М. руководил выполнением полевых исследований, провел отбор части проб, выполнил анализ литературных данных, подготовил иллюстративный материал к статье, оформил окончательный вариант статьи для публикации в журнале.

Варфоломеева К.В. осуществила анализ полученных данных, выполнила поиск литературных данных, подготовила иллюстративный материал к статье, выполнила редактирование промежуточного варианта текста статьи,

Седнев К.А. провел отбор части проб, выполнил обработку и систематизацию первичных материалов исследования, анализ данных, подготовил черновик рукописи.

Иванов С.А. осуществил отбор части проб, систематизацию первичных материалов исследования и анализ данных.

Репин В.С. осуществлял общее руководство выполнением исследовательской работы, выполнил обработку полевых спектров и спектров измерения трития, предложил форму отображения санитарного состояния территории МЯВ, отредактировал промежуточный вариант статьи.

Георгиева А.Г. организовала проведение полевых исследований, выполнила редактирование промежуточного варианта статьи.

Благодарность

Авторы выражают благодарность «Отдельному военизированному горноспасательному отряду Печорского бассейна» – филиалу открытого акционерного общества «Военизированная горноспасательная, аварийно-спасательная часть» за неоценимую помощь в доставке участников полевых исследований к местам проведения МЯВ «Глобус-4» и «Горизонт-1».

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственному контракту № 81.011.20.2 от 20 мая 2020 г. «Разработка и научное обоснование радиационно-гигиенических требований к охраняемым зонам мирных ядерных взрывов при переводе их в стадию консервации» (шифр: «Мирные РАО–20») и отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками 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. Храмов Е.В., Репин В.С., Библин А.М. и др. Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 111–123. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123.
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. Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В. и др. Оценка радиационной обстановки в районе проведения мирного ядерного взрыва «Тахта-Кугульта» // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66, № 2. С. 13–22. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-13-22.

4. Титов А. В., Шандала Н. К., Бельских Ю. С. и др. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Метеорит-5» // Радиоактивные отходы. 2021. № 16. С. 94–102. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-94-102.
5. Библин А.М., Храмцов Е.В., Репин В.С., Иванов С.А. 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.
6. Храмцов Е.В. Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» после выполнения реабилитационных работ // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 58-68. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-58-68.
7. Yakovlev E., Puchkov A., Bykov V. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities of the Pechora River estuary: Bottom sediments and water (Arctic Ocean Basin) // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 172. P. 112765. DOI:10.1016/j.marpolbul.2021.112765.
8. Ершов В.В. Возможные влияния подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в мирных целях на эколого-гидрогеологическую обстановку // Разведка и охрана недр. 2023. № 3. С. 37-42
9. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Колл. авторов под. рук. проф. В.А. Логачева. М.: Изд.АТ, 2001. 519 с.
10. Мельников В.П., Оберман Н.Г., Велижанина И.А. и др. Воздействие подземных ядерных взрывов на природную среду Севера // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 2. С. 280-291
11. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Коми в 2013 году URL: <http://www.agiks.ru/data/gosdoklad/gd2013/h8.html> (Дата обращения: 18.07.2023).
12. Репин В.С., Седнев К.А. Метод обработки спектра при измерении детектором NaI(Tl) малых уровней удельной активности ¹³⁷Cs в присутствии природных радионуклидов // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4 С. 142-148. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-142-148

Поступила: 24.01.2024 г.

Библин Артем Михайлович – руководитель Информационно-аналитического центра, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: a.biblin@niirg.ru

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

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

Иванов Сергей Анатольевич – младший научный сотрудник радиохимической лаборатории Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

Георгиева Антонина Георгиевна – главный специалист-эксперт территориального отдела Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Коми в г. Усинске, Усинск, Россия

Для цитирования: Библин А.М., Варфоломеева К.В., Седнев К.А., Иванов С.А., Репин В.С., Георгиева А.Г. Современное радиационно-гигиеническое состояние территорий проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-4» и «Горизонт-1» в Республике Коми // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 121-130. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-121-130

Modern radiation-hygienic state of the territories of the Globus-4 and Gorizont-1 peaceful nuclear explosions in the Komi Republic

Artem M. Biblin¹, Kseniya V. Varfolomeeva¹, Konstantin A. Sednev¹, Sergey A. Ivanov¹, Viktor S. Repin¹, Antonina G. Georgieva²

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

² Administration of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Republic of Komi in Usinsk, Usinsk, Russia

The article presents results of a study of the radiation environment on territories adjacent to the sites of the “Globus-4” and “Gorizont-1” peaceful nuclear explosions in the Komi Republic. Field survey was carried out in July 2021. The work provides an assessment of the radiation situation in terms of the main indicators: ambient dose equivalent rate, the content of anthropogenic radionuclides in soil, tritium in the water of water bodies and drinking water supply sources in the settlements nearest to the sites of the peaceful nuclear explosions. The values of gamma radiation ambient dose equivalent rate in all the surveyed territories are at the level of fluctuations of natural regional radiation background and amounted to 0.03 – 0.07 $\mu\text{Sv/h}$ in the territory of peaceful nuclear explosion “Globus-4”, 0.01 – 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ in the territory of “Gorizont-1”. No contaminated soil areas with anthropogenic radionuclides were detected. Tritium activity concentration in water samples does not exceed 5 Bq/kg, which is typical for global levels of this radionuclide in water bodies. The study has shown that the radiation situation in the territory of peaceful nuclear explosions “Globus-4” and “Gorizont-1” meets the requirements of SanPiN 2.6.1.2819-10 “Ensuring radiation safety of the population living in the areas of (1965 – 1988) nuclear explosions for peaceful aims” and currently poses no threat to public health. A conservative dose estimate of additional anthropogenic exposure of individuals from the population from tritium intake with water from centralised water supply sources was 0.065 $\mu\text{Sv/year}$. Long-term radiation safety of the researched territories requires organisation of radiation monitoring, determination of protected zone boundaries and installation of readable information signs warning about radiation hazard and prohibition of economic activities.

Key words: peaceful nuclear explosions, tritium, Komi Republic, Vorkuta, radionuclides, radioactive contamination, radiation safety, radiation situation.

Personal contribution of authors

Artem M. Biblin – supervised the field part of the research, participated in collection of samples, analyzed literature data, arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Kseniya V. Varfolomeeva – analysed the obtained data, performed literature data search, prepared illustrative material for the article, edited an intermediate version of the article text.

Konstantin A. Sednev – collected part of the samples, processed and systematised raw materials of the study, analysed the data, prepared the draft manuscript.

Sergey A. Ivanov – collected part of the samples, processed and systematised raw materials of the study, analysed the data.

Viktor S. Repin – carried out general management of the research work, performed processing of field spectra and tritium measurement spectra, proposed a form of displaying the sanitary condition of the PNE territory, edited manuscript.

Antonina G. Georgieva – organised the field research work, edited the draft manuscript.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to “Separate paramilitary mountain rescue squad Pechora Basin” branch of the open joint-stock company “Paramilitary mountain rescue, emergency and rescue unit” for invaluable assistance in transporting the participants of field studies to the sites of MNR “Globe-4” and “Gorizont-1”.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the State Contract No. 81.001.20.2 with the Federal Medical and Biological Agency of Russia and the sectoral program of Rosпотребнадзор 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.

Artem M. Biblin

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

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

Radiation-hygienic characteristics of sources of drinking water supply.”

References

1. Khrantsov 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123. (In Russian).
2. Ramzaev VP, Biblin AM, Repin VS, Khrantsov 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. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26>.
3. Titov AV, Shandala NK, Isaev DV, Belskikh IS, Semenova MP, Doronieva TA, et al. Radiation Survey in the Area of Peaceful Nuclear Explosion «Takhita-Kugulta». *Medicinskaja radiologija i radiacionnaja bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(2): 13-22. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-13-22 (In Russian).
4. Titov AV, Shandala NK, Belskikh IS, Isaev DV, Gushchina JV, Doronieva TA, et al. The Radiation Situation in the Area of the Meteorit-5 Peaceful Nuclear Explosion. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*. 2021;16: 94-102. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-94-102. (In Russian).
5. Biblin AM, Khrantsov EV, Repin VS, Ivanov SA, Varfolomeeva KV, Sednev KA, et al. Radiation situation at the “Pirit” peaceful underground nuclear explosion site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;5(4): 149-161. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-149-161.
6. Khrantsov EV. Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion «Globus-1» after performing the rehabilitation works. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 58-68. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-58-68. (In Russian).
7. Yakovlev E, Puchkov A, Bykov V. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities of the Pechora River estuary: Bottom sediments and water (Arctic Ocean Basin). *Marine Pollution Bulletin*. 2021;172: 112765. DOI: 10.1016/j.marpollbul.2021.112765.
8. Ershov VV. Possible effects on the ecological and hydrological situation of the territories of underground nuclear explosions. *Razvedka i ohrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2023;3: 37-42. DOI: 10.53085/0034-026X_2023_04_37. (In Russian).
9. Logachev VA, Voloshin NP, Dubasov YV, Kornilovich EP. Peaceful Nuclear Explosions: Providing General and Radiation Safety during These Operations. Moscow: Izdat Publisher; 2001. 519 p. (In Russian).
10. Melnikov VP, Oberman NG, Velizhanina IA, Davidenko NM. The impact of underground nuclear explosions on the natural environment of the North. *Geologija i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2000;41(2): 280-291. (In Russian).
11. State report on the condition of the environment of the Komi Republic in 2013. Available from: <http://www.agiks.ru/data/gosdoklad/gd2013/h8.html> (Accessed: 18.01.2024). (In Russian).
12. Repin VS, Sednev KA. Spectrum processing method for measuring low levels of specific activity of ¹³⁷Cs with a NaI(Tl) detector in the presence of natural radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 142-148. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-142-148 (In Russian).

Received: January 24, 2024

For correspondence: Artem M. Biblin – Head, Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: a.biblin@niirg.ru)

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

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

Sergey A. Ivanov – Junior Researcher, Radiochemical Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Antonina G. Georgieva – Chief Expert Specialist, Administration of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Republic of Komi in Usinsk, Usinsk, Russia

For citation: Biblin A.M., Varfolomeeva K.V., Sednev K.A., Ivanov S.A., Repin V.S., Georgieva A.G. Modern radiation-hygienic state of the territories of the Globus-4 and Gorizont-1 peaceful nuclear explosions in the Komi Republic. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 121-130. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-121-130

Правила для авторов журнала «Радиационная гигиена»

Правила для авторов составлены на основе «Белой книги Совета научных редакторов о соблюдении принципов целостности публикаций в научных журналах, 2012» (CSE's White Paper on Promotion Integrity in Scientific Journal Publications, 2012 Update) и «Рекомендаций по проведению, описанию, редактированию и публикации результатов научной работы в медицинских журналах, декабрь 2016» (ICMJE Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing and Publication of Scholarly Work in Medical Journals, December 2016).

Принимаются оригинальные научные статьи на русском и английском языках, соответствующие профилю журнала «Радиационная гигиена» и отражающие результаты оригинальных научных исследований авторов, экспериментальные, теоретические статьи, обзоры, краткие сообщения, дискуссионные статьи, рецензии на работы по актуальным вопросам радиационной гигиены, писем в редакцию.

Работы для опубликования в журнале должны быть представлены в соответствии с данными требованиями:

- к опубликованию в журнале принимаются статьи на русском и английском языках. Если статья представлена на английском языке, обязательно нужно полностью дублировать ее и на русском языке. Обращаем Ваше внимание на качество английского языка!

- материалы, представляемые в статье, не должны быть ранее опубликованными в других печатных изданиях. Авторам следует информировать редакцию журнала о том, что какие-то части этих материалов уже опубликованы и могут рассматриваться как дублирующие. В таких случаях в новой статье должны быть ссылки на предыдущие работы. Копии таких материалов прилагаются к рукописи, чтобы редакция имела возможность принять решение, как поступить в данной ситуации. Не допускается направление статей, которые уже напечатаны в других изданиях или представлены для печати в другие издательства.

- редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи.

- редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать представленные работы. Все статьи, поступающие в редакцию журнала, проходят двойное слепое рецензирование.

- статья должна сопровождаться официальным направлением учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы. Должно быть представлено экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи. Статья должна быть подписана всеми авторами. Все соавторы должны быть согласны с публикацией текущей версии статьи

- рукописи, оформленные не в соответствии с правилами, к дальнейшему рассмотрению не допускаются.

- объем обзорных аналитических, исторических статей не должен превышать 35 страниц машинописного текста, оригинальных исследований – 25 страниц, дискуссионных статей – 10, кратких сообщений и заметок из практики – 10 страниц.

В названное количество страниц публикаций входит основной текст рукописи таблицы, рисунки и легенды к ним, а также название, фамилия и инициалы авторов, название учреждений, резюме, ключевые слова, список литературы, References, данные об авторах, их личном вкладе в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования (все вышеперечисленное – на русском и английском языках).

- текст статьи печатается на одной стороне листа формата А4 шрифтом Times New Roman кеглем 14, с межстрочным ин-

тервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева – 2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

СТРУКТУРА СТАТЬИ

Титульный лист должен содержать:

- **название статьи** должно кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В него необходимо вложить как информативность, так и привлекательность, уникальность научного творчества автора. Не допускается использование сокращений и аббревиатур, а также торговых (коммерческих) названий приборов, медицинской аппаратуры и т.п.);

Приводится на русском и английском языках.

- **фамилия и инициалы автора(ов);**

- любые изменения в списке авторов после подачи статьи в редакцию должны быть одобрены всеми авторами.

Фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru.

- **наименование учреждений**, в которых работают авторы с указанием ведомственной принадлежности (Роспотребнадзор, Минздрав России, РАМН и т.п.), город, страна (при этом префиксы учреждений, указывающие на форму собственности, статус организации (ГУ ВПО, ФГБУ, ФБУН и т.д.) не указываются);

- рядом с фамилией автора(ов) и названием учреждения цифрами в верхнем регистре обозначается, в каком учреждении работает каждый из авторов. Если все авторы работают в одном учреждении, указывать место работы каждого автора отдельно не нужно;

- вся информация предоставляется на русском и английском языках. **Указывается официально принятый английский вариант наименования организаций!**

- **Резюме.** После титульного листа размещается резюме статьи на русском и английском языках (объемом не менее 250 слов каждая). Резюме выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В резюме следует излагать только релевантную информацию.

В нем должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 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 доказательство 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 должны быть размещены в основном тексте. Перед каждым рисунком, диаграммой или таблицей в тексте обязательно должна быть ссылка. В подписях к микрофотографиям, электронным микрофотографиям обязательно следует указывать метод окраски и обозначать масштабный отрезок.

Диаграммы должны быть представлены в исходных файлах. Рисунки (диаграммы, графики) должны иметь подпись всех осей с указанием единиц измерения СИ. Легенда выносится за пределы рисунка.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Заключение (Conclusion). Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде приводятся главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркиваются 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 источника 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, Rosпотребнадзор, 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 научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия/ URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 16.06.2019)

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. REJR. 2018. Т.8, №3. С. 60-73. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332) С. 5.

Диссертация и автореферат диссертации:

Фенухин В.И. Этнополитические конфликты в современной России: на примере Северо-Кавказского региона: дис.... канд. полит. наук: защищена 22.01.02: утв. 15.07.02. М., 2002. 215 с.

Кадука М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2001. 23 с.

Второй список литературы (References)

полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется также в соответствии с Ванкуверским форматом цитирования

При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов должны быть транслитерированы. Название работы переводится на английский язык. 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

DiabetesAustralia. Diabetes globally [Internet]. CanberraACT: 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 (титульный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате Tiff, JPEG с разрешением 300 dpi. При отправке файла обязательно указывайте номер рисунка, соответствующий его номеру в статье.

3. Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения издателю. Электронный вариант заполненного и подписанного всеми авторами договора следует отправить в качестве дополнительного файла в формате .pdf.

4. Официальное направление учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы в формате .pdf.

5. Экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи в формате .pdf.

ДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ В СЛУЧАЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАГИАТА, ФАБРИКАЦИИ И ФАЛЬСИФИКАЦИИ ДАННЫХ

В случае обнаружения недобросовестного поведения со стороны автора, плагиата, фабрикация или фальсификация данных редакция руководствуется правилами COPE. Под недобросовестным поведением мы понимаем любые действия ученого, включающие ненадлежащее обращение с объектами изучения или намеренное манипулирование научной информацией, при котором она перестает отражать наблюдаемые исследования; а также поведение ученого, которое не соответствует принятым этическим и научным стандартам.

К недобросовестному поведению журнал «Радиационная гигиена» не относит честные ошибки или честные расхождения в плане, проведении, интерпретации или оценке исследовательских методов или результатов или недобросовестное поведение, не связанное с научным процессом.

Справки по телефону: (812)2334283 и (812)2335016 (редакция журнала «Радиационная гигиена»). Факс: (812)2335363, 2334283.

