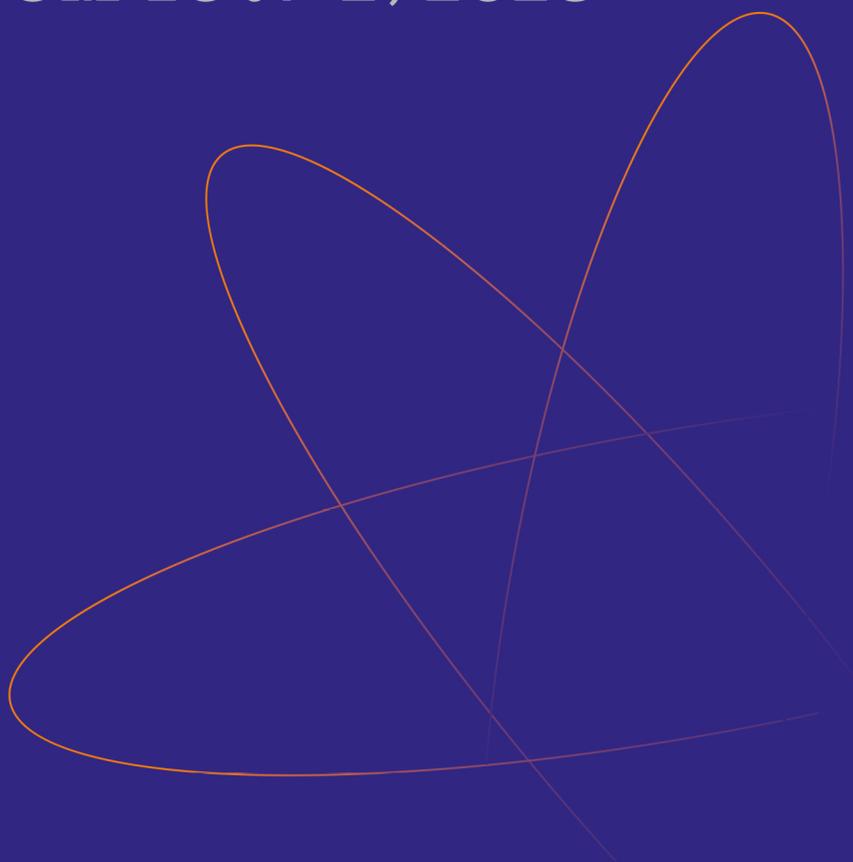


ISSN 1998-426X (print)  
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 16 № 2, 2023



**Научно-практический  
журнал**

**УЧРЕДИТЕЛЬ:**  
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.

Издается ежеквартально.

Полное или частичное воспроизведение материалов, содержащихся в настоящем издании, допускается с письменного разрешения редакции.

Ссылка на журнал «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» обязательна.

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)

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

Адрес 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

Тираж 150 экз.

ISSN 1998-426X



9 771998 426783 >

Индекс для подписки в агентстве  
«Книга-Сервис» - **Ф57988**

© «Радиационная гигиена», 2023

# РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

## RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета  
**Г.Г. Онищенко**

Главный редактор  
**И.К. Романович**



Том 16 № 2, 2023

## Председатель редакционного совета

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

## Главный редактор

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

## Заместитель главного редактора

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

## Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Редакционная коллегия

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

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

**Архангельская Генриэтта Владимировна** — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.м.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

**Ермолина Елена Павловна** — ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации; к.м.н., доцент (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

**Санжарова Наталья Ивановна** — ФГБУН «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и радиэкологии» Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» 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)

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

**FOUNDER:**  
Federal Scientific Organization  
«Saint-Petersburg Research Institute  
of Radiation Hygiene  
after Professor P.V. Ramzaev»  
Federal Service for Surveillance  
on Consumer Rights Protection  
and Human Well-Being

Quarterly published

**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

# RADIATION HYGIENE

**Chairman of Editorial Council**

Gennadiy G. Onishchenko

**Editor-in-Chief**

Ivan K. Romanovich



Vol. 16 № 2, 2023

# RADIATION HYGIENE

---

Vol. 16 № 2, 2023

## Chairman of Editorial Council

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

## Editor-in-Chief

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

## Deputy Editor-in-Chief

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

## Members of Editorial Council

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

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

**Roman V. Buzinov** – Federal Budgetary Scientific Facility “North-West Public Health Research Center”, doctor of medical sciences, docent, honorable physician of the Russian Federation (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

**Genrikh A. Sofronov** – Federal State Scientific Organization «Institute of Experimental Medicine», Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Medical Sciences, (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

## Editorial Board

**Aleksandr V. Alekhnovich** – 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. Arkhangel'skaya** – 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. Vakulovskiy** – Federal State Budgetary Institution Research and Production Association «Typhoon», Doctor of Engineering, Professor (Kaluga region, Russian Federation)

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

**Grigoriy A. Gorskiy** – Federal Budgetary Scientific Facility «St-Petersburg Institute of Radiation Hygiene after prof. 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 Juhon Sören** – Professor of medical radiation physics department of Lund University (Malmo, Sweden)

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

**Valeriy P. Ramzaev** – Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Candidate of Medicine (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Victor S. Repin** – Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Doctor of Biology (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Natalia I. Sanzharova** – Scientific Supervisor of the All-Russian Research Institute of Radiology and Radioecology, National Research Center «Kurchatov Institute» Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of RAS (Obninsk, Russian Federation)

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 16 № 2, 2023

### НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

<i>Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е., Гаевой С.В., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А., Кокоулина Е.С., Королева Н.А.</i> <b>Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения.</b> <b>Часть 2: Дозы облучения населения восточных районов Оренбургской области.....</b>	<b>7</b>
<i>Чипига Л.А., Звонова И.А., Водоватов А.В., Петрякова А.В., Станжевский А.А., Вазенина Д.А., Смоляруч М.Я., Рыжов С.А.</i> <b>Совершенствование подхода к определению радиологических критериев выписки пациентов после радионуклидной терапии.....</b>	<b>19</b>
<i>Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Толстых Е.И.</i> <b>Неопределенность оценки доз в костном мозге от <sup>89,90</sup>Sr из-за изменчивости химического состава и плотности кости.....</b>	<b>32</b>
<i>Крышев А.И., Булгаков В.Г., Каткова М.Н., Полянская О.Н., Бурякова А.А.</i> <b>Использование результатов радиационного мониторинга окружающей среды для контроля источника выбросов йода-131 предприятием.....</b>	<b>44</b>
<i>Рамзаев В.П., Барковский А.Н.</i> <b>Оценка вторичного радиоактивного загрязнения дезактивированного земельного участка, расположенного на территории зоны отдыха в лесистой местности.....</b>	<b>52</b>
<i>Васильев А.С.</i> <b>Облучение обучающихся и сотрудников детских учреждений Ленинградской области природными источниками излучения.</b> <b>Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования.....</b>	<b>65</b>
<i>Востротин В.В., Финашов Л.В.</i> <b>Оценка поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г.....</b>	<b>78</b>
<b>РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ</b>	
<i>Абалкина И.Л., Аракелян А.А., Муленкова Е.В., Самойлов А.А., Панченко С.В., Ширнин М.Ю.</i> <b>Разработка сценариев облучения населения для земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением.....</b>	<b>91</b>
<i>Хакимова Н.У., Зоитова М.А.</i> <b>Урановые хвостохранилища г. Истиклола: история, проблемы, решения.....</b>	<b>102</b>
<b>ОБЗОРЫ</b>	
<i>Калайдо А.В., Кормановская Т.А.</i> <b>Перспективы обеспечения радиационной безопасности при облучении природными источниками ионизирующего излучения на новых территориях Российской Федерации.....</b>	<b>114</b>
<b>ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ</b>	
<i>Водоватов А.В., Чипига Л.А., Братилова А.А., Дружинина П.С., Шацкий И.Г., Петрякова А.В., Сарычева С.С., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р., Капырина Ю.В., Солдатов И.В., Пузырев В.Г., Рыжов С.А.</i> <b>Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований». Предпосылки к переработке.....</b>	<b>126</b>

## CONTENTS

Vol. 16 № 2, 2023

### RESEARCH ARTICLES

<i>Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Vyaltsina N.E., Gaevoy S.V., Kononenko D.V., Saprykin K.A., Kokoulina E.S., Koroleva N.A.</i> <b>Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation.</b> <b>Part 2: Doses to the population of the eastern districts of the Orenburg region.....</b>	<b>16</b>
<i>Chipiga L.A., Zvonova I.A., Vodovатов A.V., Petryakova A.V., Stanzhevsky A.A., Vazhenina D.A., Smoliarchuk M.Ya., Ryzhov S.A.</i> <b>Improvement of the approach to definition of patient release criteria after radionuclide therapy.....</b>	<b>29</b>
<i>Shishkina E.A., Sharagin P.A., Tolstykh E.I.</i> <b>The uncertainty of estimation of doses to the bone marrow from <sup>89,90</sup>Sr due to the variability of the chemical composition and bone density.....</b>	<b>41</b>
<i>Kryshch A.I., Bulgakov V.G., Katkova M.N., Polyanskaya O.N., Buryakova A.A.</i> <b>Use of the radiation environmental monitoring results for control of the atmospheric releases of iodine-131 by the facility.....</b>	<b>50</b>
<i>Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.</i> <b>Assessment of secondary radioactive contamination of a decontaminated land plot located on the territory of a recreation base in a wooded area.....</b>	<b>62</b>
<i>Vasilyev A.S.</i> <b>Exposure of students (pupils) and employees of educational institutions in the Leningrad region to natural sources of radiation</b> <b>Part 1: Results of a comprehensive survey.....</b>	<b>75</b>
<i>Vostrotin V.V., Finashov L.V.</i> <b>Estimate of tritium intake in the air from coastal plants of Lake Kyzyltash in 2021.....</b>	<b>89</b>
<b>RADIATION SAFETY DURING THE DECOMMISSIONING AND OPERATION OF HERITAGE SITES</b>	
<i>Abalkina I.L., Arakelyan A.A., Mulenkov E.V., Samoylov A.A., Panchenko S.V., Shirnin M.Yu.</i> <b>Development of public exposure scenarios for land sites with residual radioactive contamination.....</b>	<b>100</b>
<i>Khakimova N.U., Zaitova M.A.</i> <b>Uranium tailings in the Istiqlol city: history, problems, solutions.....</b>	<b>111</b>
<b>REVIEWS</b>	
<i>Kalaydo A.V., Kormanovskaya T.A.</i> <b>Prospects of provision of radiation safety from natural sources of ionizing exposure on the new territories of the Russian Federation.....</b>	<b>124</b>
<b>ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENE PASSPORTIZATION</b>	
<i>Vodovатов A.V., Chipiga L.A., Bratilova A.A., Druzhinina P.S., Shatskiy I.G., Petryakova A.V., Sarycheva S.S., Biblin A.M., Akhmatdinov R.R., Kapryrina Yu.N., Soldatov I.V., Puzyrev V.G., Ryzhov S.A.</i> <b>Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ "Data on patient doses from medical X-ray examinations". Prerequisites for the update.....</b>	<b>134</b>

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 16 № 2, 2023

### ИСТОРИЯ ГИГИЕНЫ

*Архангельская Г.В.*

**Воспоминания о первых годах работы в Ленинградском научно-исследовательском институте радиационной гигиены ..... 137**

## CONTENTS

Vol. 16 № 2, 2023

### HISTORY OF HYGIENE

*Arkhangelskaya G.V.*

**Memories of the first years of work in the Leningrad Research Institute of Radiation Hygiene ..... 137**

## Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения.

### Часть 2:

## Дозы облучения населения восточных районов Оренбургской области

Т.А. Кормановская<sup>1</sup>, И.К. Романович<sup>1</sup>, Н.Е. Вяльцина<sup>2</sup>, С.В. Гаевой<sup>2</sup>, Д.В. Кононенко<sup>1</sup>,  
К.А. Сапрыкин<sup>1</sup>, Е.С. Кокоулина<sup>1</sup>, Н.А. Королева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Оренбургской области, Оренбург, Россия

*В статье приведены оценки доз облучения населения 6 районов восточной части Оренбургской области за счет природных источников ионизирующего излучения, полученные по результатам комплексного радиационного обследования 34 населенных пунктов, где ранее были выявлены повышенные уровни содержания природных радионуклидов в воде подземных источников питьевого водоснабжения. Показано, что в 18 населенных пунктах средняя годовая эффективная индивидуальная доза природного облучения соответствует, согласно принятой в ОСПОРБ 99/2010 классификации, повышенному облучению за счет природных источников (от 5 до 10 мЗв/год), а еще в 7 – высокому (свыше 10 мЗв/год); при этом основную дозовую нагрузку население получает за счет ингаляции радона и его дочерних продуктов распада. Из перечня обследованных населенных пунктов Кваркенского и Адамовского районов, где были зарегистрированы самые высокие уровни содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, были выбраны 4 населенных пункта для проведения углубленного обследования с целью выявления основного источника поступления радона в здания. Обследование включало измерения плотности потока радона с поверхности грунта, объемной активности радона в почвенном воздухе, удельной активности и эффективной удельной активности природных радионуклидов в пробах материалов строительных конструкций жилых и общественных зданий и в пробах почвы с территории населенных пунктов, а также удельной активности радона в воде источников подземного водоснабжения, подающейся по распределительной сети населенных пунктов. Результаты обследования показали, что основным источником поступления в воздух помещений радона, являющегося главной причиной высоких и повышенных доз природного облучения населения, является эксхалация из грунта под зданиями; по сравнению с основным источником поступления, вклад радона, поступающего в воздух в процессе пользования водой, является незначительным.*

**Ключевые слова:** природные источники ионизирующего излучения, природные радионуклиды, радон, подземные источники водоснабжения, питьевая вода, плотность потока радона, почвенный воздух, мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, Оренбургская область.

### Введение

Результаты комплексного радиационного обследования в части природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ), выполненного в 2019 г. специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева совместно с Управлением Роспотребнадзора по Оренбургской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» в рамках Государственного контракта в 34 населен-

ных пунктах восточных районов Оренбургской области (Адамовский, Кваркенский, Новоорский, Домбаровский, Светлинский и Ясенский городской округ (ГО)) [1], стали основой для оценки доз облучения жителей восточного Оренбуржья за счет ПИИИ.

Радиационное обследование населенных пунктов, кроме повышенного содержания природных радионуклидов (ПРН) в воде подземных источников водоснабжения

**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

(в первую очередь, радона) [2], выявило многочисленные факты превышения гигиенического норматива среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий населенных пунктов восточных районов Оренбургской области [1]. Выявление высоких уровней содержания радона в помещениях без использования воды подземных источников (наряду с помещениями с использованием воды) свидетельствует о том, что радон в воде не является единственным источником поступления радона в здания, как предполагалось до начала проведения обследования.

Общеизвестно 3 основных источника поступления радона в воздух помещений [3, 4]:

1. Из подстилающего грунта под зданием. Это наиболее значимый источник поступления радона в здания на территориях, где близко к поверхности залегают урансодержащие породы. Радон выходит из грунта под зданием в смеси с почвенным воздухом и через трещины фундамента, отверстия ввода-вывода коммуникаций и т.п. проникает в помещения. Участки с высокой плотностью потока радона с поверхности грунта называются радоноопасными, и при проектировании зданий на таких участках в проекте должны быть предусмотрены радонозащитные мероприятия, чтобы содержание радона и его короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) в здании после окончания строительства соответствовало гигиеническим нормативам (п. 5.1.6 ОСПОРБ 99/2010<sup>1</sup> и п. 4.2.2 СанПиН 2.6.1.2800-10<sup>2</sup>). Содержание <sup>238</sup>U и <sup>226</sup>Ra, продуктом распада которого и является радон (<sup>222</sup>Rn), в грунтах и породах определяется только геологическими характеристиками конкретной местности.

2. Из строительных конструкций здания. Источником радона в помещении могут быть строительные материалы, из которых построено здание, при повышенном содержании в них радия. Однако использование при строительстве материалов, соответствующих установленным гигиеническим нормативам содержания ПРН (по величине эффективной удельной активности ПРН,  $A_{эфф}$ ), обеспечивает в большинстве случаев дальнейшее соответствие зданий по содержанию радона и его ДПР в воздухе требованиям санитарного законодательства.

3. Из воды подземных источников (путем перехода радона из воды в воздух помещений в процессе водопользования).

**Цель исследования** – определение значимости вклада отдельных источников в суммарную дозу природного облучения населения восточных районов Оренбургской области.

### Задачи исследования

1. Провести оценку доз облучения населения за счет каждого источника природного облучения.

2. Выявить основной источник наиболее значимого дозообразующего фактора для населения с высокими уровнями облучения за счет ПИИИ.

### Виды, объем и методы исследований

Оценка доз облучения населения обследованных населенных пунктов Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясненского ГО проводилась в соответствии с МУ 2.6.1.1088-02<sup>3</sup> по результатам выполненных в 2019 г. в рамках комплексного радиационного обследования измерений мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения на открытой местности населенных пунктов, измерений МАЭД гамма-излучения и уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, а также исследований содержания ПРН в питьевой воде.

Для решения задачи по выявлению основного источника поступления радона в помещения жилых и общественных зданий в 4 населенных пунктах с высокими уровнями содержания радона в воздухе помещений было проведено:

– 80 измерений плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта (средство измерений – комплекс измерительный для мониторинга радона КАМЕРА-01 с блоками детектирования БДБ-13);

– 16 измерений ОА радона в почвенном воздухе (средство измерений – радиометр объемной активности радона-222 AlphaGUARD PQ2000PRO с программным обеспечением DataVIEW v.15; вспомогательное

<sup>1</sup> 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. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115 [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 11, 2010, registration No. 18155. (In Russ.)]

<sup>2</sup> 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. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 27 января 2011 г., регистрационный № 19587 [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on January 27, 2011, registration No. 19587. (In Russ.)]

<sup>3</sup> Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Методические указания МУ 2.6.1.1088-02. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 04.01.2002 г. [Assessment of individual effective doses to the population due to natural sources of ionizing radiation. Guidelines MU 2.6.1.1088-02. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 04.01.2002. (In Russ.)]

оборудование – комплект «Soil Gas Probe» и воздухо-дувка AlphaPUMP);

– 8 измерений удельной активности (УА) ПРН в пробах строительных материалов, использованных для возведе-ния жилых и общественных зданий (средство измере-ний – спектрометр энергии гамма-излучения сцинтилля-ционный портативный Гамма-1С/NB1-01 с программным обеспечением LSRM SpectralLine Handy);

– 4 измерения УА ПРН в пробах поверхностного слоя грунта (0–5 см) с территории населенных пунктов (средство измерений – установка спектрометрическая МКС-01А «МУЛЬТИРАД» с программным обеспечением «ПРОГРЕСС-5»);

– 9 измерений УА радона в воде источников подзем-ного водоснабжения, подающейся по распределитель-ной сети населенных пунктов (средства измерений – ра-диометр объемной активности радона-222 AlphaGUARD PQ2000PRO с программным обеспечением DataVIEW v.15, вспомогательное оборудование – комплект «AquaKIT» и воздуходувка AlphaPUMP; комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» модификации «АР», вспомогательное оборудование – автономная воздуходувка АВ-07 с набо-ром пробоотборников).

Эффективная удельная активность ( $A_{эфф}$ ) ПРН в про-бах строительных материалов рассчитывалась в соответ-ствии с п. 5.3.4 НРБ-99/2009<sup>4</sup>, а  $A_{эфф}$  ПРН в пробах грунта – в соответствии с Приложением 7 к СанПиН 2.6.1.2800-10.

#### **Дозы облучения населения восточных районов Оренбургской области за счет ПИИИ**

На основании результатов комплексного радиацион-ного обследования были выполнены оценки доз внешне-го терригенного облучения, доз внутреннего облучения за счет потребления питьевой воды и доз внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона населе-ния 34 населенных пунктов Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясенского ГО. Для оценки дозы облучения населения за счет всех ПИИИ, помимо полученных результатов из-мерений параметров радиационной обстановки, были ис-пользованы среднемировые значения доз за счет <sup>40</sup>K (0,17 мЗв/год)<sup>5</sup> и за счет ингаляционного поступления долго-живущих ПРН с пылью из приземного слоя атмосферно-го воздуха (0,006 мЗв/год)<sup>6</sup>, среднероссийское значение дозы за счет потребления пищевых продуктов (0,12 мЗв/

год)<sup>7</sup>, а также расчетное значение дозы за счет космиче-ского излучения (нейтронный компонент и космогенные радионуклиды) для территории Оренбургской области (0,097 мЗв/год) – суммарная доза за счет этих факторов равна 0,390 мЗв/год. Доза внешнего облучения включа-ет в себя как дозу за счет терригенного излучения, так и дозу за счет ионизирующего компонента космического излучения, расчетное значение которой для территории Оренбургской области составляет 0,242 мЗв/год, а доза за счет космического излучения в целом – 0,339 мЗв/год [3]. В таблице 1 представлены оценки средних по каждо-му обследованному населенному пункту индивидуаль-ных годовых эффективных доз облучения населения за счет отдельных составляющих, а также суммарные дозы природного облучения жителей. Для оценки дозы внут-реннего облучения радоном и его ДПР использовались результаты измерений только в жилых домах, поскольку проведение подобных расчетов на основе результатов интегральных измерений ОА радона в общественных зда-ниях с некруглосуточным пребыванием людей может при-водить к искаженным оценкам [5].

В 9 населенных пунктах из 34 суммарная доза не пре-высила 5 мЗв/год, что в соответствии с ОСПОРБ 99/2010 классифицируется как приемлемый уровень природно-го облучения населения. Повышенные (в интервале от 5 до 10 мЗв/год) дозы облучения за счет ПИИИ получают жители 18 населенных пунктов. В 20% населенных пун-ктов (7 из 34) средняя доза облучения жителей за счет ПИИИ превышает порог в 10 мЗв/год, что классифици-руется как высокий уровень природного облучения на-селения: Адамовский район – с. Аниховка, с. Брацлавка, с. Карабутак, с. Нижняя Кийма, п. Нововинницкое; Домбаровский район – с. Караганда; Кваркенский рай-он – с. Аландское.

Причиной повышенного и высокого природного об-лучения жителей 25 населенных пунктов Адамовского, Домбаровского, Кваркенского, Светлинского районов и Ясенского ГО во всех проанализированных случаях яв-ляются высокие уровни содержания радона в воздухе по-мещений жилых домов, обусловленные поступлением ра-дона из грунта под зданиями. Для наглядности на рисунке графически показана структура суммарной дозы природ-ного облучения жителей с. Бриент (приемлемый уровень) и с. Аландское (высокий уровень) Кваркенского района.

На рисунке наглядно видно, что практически вся доза природного облучения населения жителей с. Аландское

<sup>4</sup> 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.)]

<sup>5</sup> Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации МР 2.6.1.0088-14. Утверждены врио Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 18.03.2014 г. (далее – МР 2.6.1.0088-14). Пункт 4.4.2 [Federal statistical form No. 4-DOZ. Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background. Guidelines MR 2.6.1.0088-14. Approved by the acting Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 18.03.2014 (hereinafter – MR 2.6.1.0088-14) (In Russ.) Paragraph 4.4.2.]

<sup>6</sup> Пункт 4.4.9 МР 2.6.1.0088-14 [Paragraph 4.4.9 of MR 2.6.1.0088-14.]

<sup>7</sup> Пункт 4.4.8 МР 2.6.1.0088-14 [Paragraph 4.4.8 of MR 2.6.1.0088-14.]

Таблица 1

Средние индивидуальные годовые эффективные дозы облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения, мЗв

[Table 1

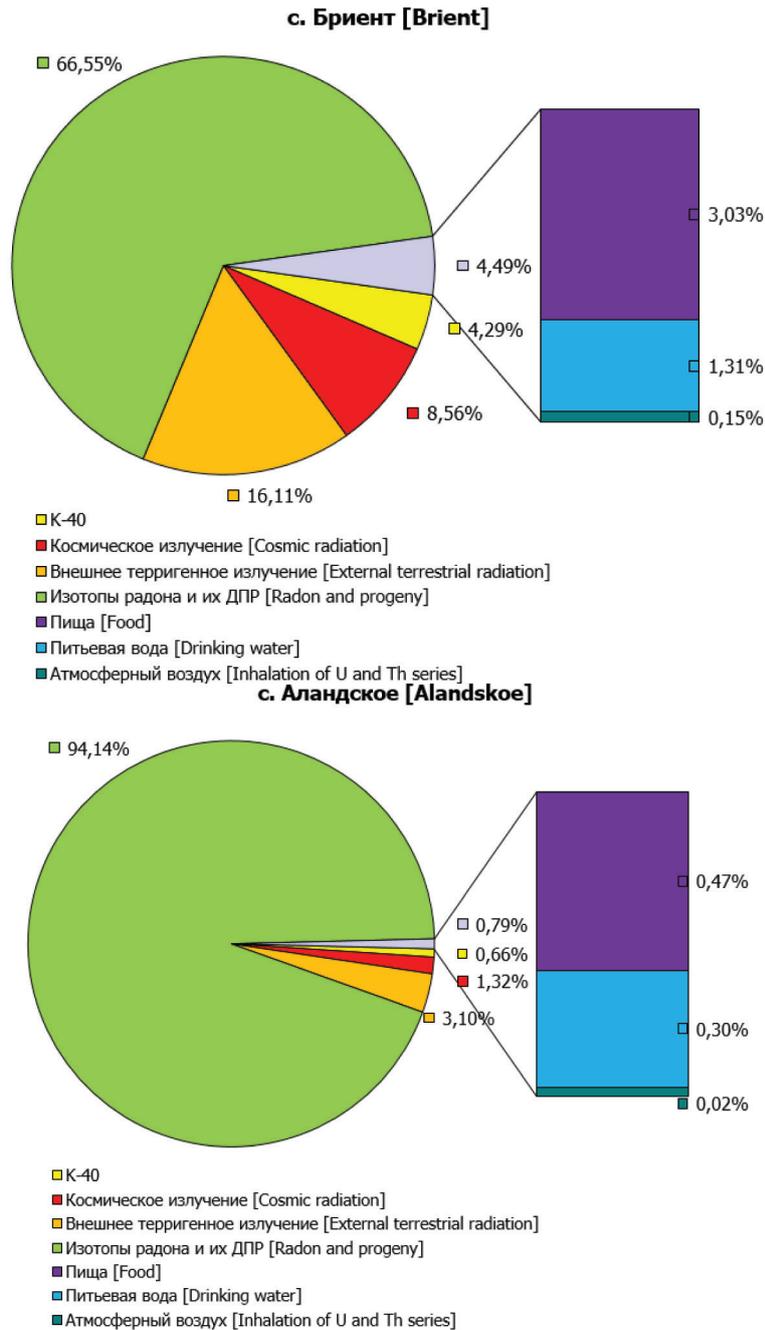
Individual average annual effective doses to the population due to natural sources of ionizing radiation, mSv]

Район, населенный пункт [District, settlement]	<sup>40</sup> K+пища+ атмосферный воздух [ <sup>40</sup> K+Food+Inhalation of U and Th series]	Внешнее облучение [External radiation]	Радон [Radon]	Питьевая вода [Drinking water]	Полная [Overall]
Адамовский район [Adamovsky district]					
с. Андреевка [Andreevka]	0,393	0,97	8,158	0,054	9,575
с. Аниховка [Anikhovka]	0,393	0,97	16,940	0,223	<b>18,526</b>
п. Белополье [Belopol'e]	0,393	0,90	3,368	0,063	4,724
с. Брацлавка [Bratslavka]	0,393	1,02	10,087	0,104	<b>11,604</b>
п. Джарлинский [Dzharlinskiy]	0,393	0,88	7,426	0,046	8,745
с. Джасай [Dzhasay]	0,393	0,95	5,696	0,032	7,071
п. Жуламансай [Zhulamansay]	0,393	0,88	4,166	0,099	5,538
с. Карабутак [Karabutak]	0,393	1,02	10,753	0,028	<b>12,194</b>
п. Мещеряковский [Meshcheryakovskiy]	0,393	0,90	3,368	0,025	4,686
с. Нижняя Кийма [Nizhnaya Kiyma]	0,393	0,90	11,684	0,042	<b>13,019</b>
п. Нововинницкое [Novovinnitskoe]	0,393	1,04	16,075	0,060	<b>17,568</b>
п. Теренсай [Terensay]	0,393	0,95	6,096	0,057	7,496
п. Энбекши [Enbekshiy]	0,393	0,97	4,765	0,214	6,342
Домбаровский район [Dombarovskiy district]					
п. Домбаровский [Dombarovskiy]	0,393	0,92	3,967	0,177	5,457
с. Караганда [Karaganda]	0,393	1,02	13,879	0,050	<b>15,342</b>
Кваркенский район [Kvarkenskiy district]					
п. Айдырлинский [Aydylinskiy]	0,393	1,04	5,430	0,017	6,880
с. Аландское [Alandskoe]	0,393	1,04	24,258	0,078	<b>25,769</b>
с. Бриент [Brient]	0,393	0,88	2,636	0,052	3,961
с. Екатериновка [Ekaterinovka]	0,393	0,88	3,568	0,205	5,046
с. Зеленодольск [Zelenodol'sk]	0,393	0,88	6,428	0,028	7,729
с. Кваркено [Kvarkeno]	0,393	1,02	6,362	0,127	7,902
п. Кировск [Kirovsk]	0,393	1,04	2,703	0,042	4,178
п. Красноярский [Krasnoyarskiy]	0,393	0,97	3,301	0,046	4,710
с. Новооренбург [Novoorenburg]	0,393	0,90	7,227	0,047	8,567
с. Приморск [Primorsk]	0,393	0,88	3,767	0,018	5,058
Новоорский район [Novoorskiy district]					
с. Караганка [Karaganka]	0,393	0,95	2,304	0,032	3,679
с. Тасбулак [Tasbulak]	0,393	0,95	0,574	0,027	1,944
Светлинский район [Svetlinskiy district]					
п. Актюбинский [Akt'yubinskiy]	0,393	0,88	4,033	0,140	5,446
п. Восточный [Vostochnyy]	0,393	0,95	2,902	0,075	4,320
Ясененский ГО [Yasnenskiy urban okrug]					
с. Верхний Киембай [Verkhniy Kiyembay]	0,393	0,88	2,902	0,029	4,204
с. Еленовка [Elenovka]	0,393	0,95	3,701	0,023	5,067
п. Комарово [Komarovo]	0,393	0,90	7,027	0,019	8,339
с. Котансу [Kotansu]	0,393	0,88	4,366	0,141	5,780
п. Новосельский [Novosel'skiy]	0,393	0,90	6,495	0,177	7,965

Кваркенского района (почти 95%) приходится на долю радона, в то время как в с. Бриент вклад этого фактора природного облучения в суммарную дозу составляет чуть более 65%.

В ходе выполнения первой задачи данного исследования (оценка доз облучения населения за счет каждого источника природного облучения) были выявлены населенные пункты Адамовского, Домбаровского, Кваркенского, Светлинского районов и Ясненского ГО с повышенными и высокими (согласно классификации ОСПОРБ 99/2010)

средними дозами природного облучения жителей; их доля по отношению к числу всех обследованных населенных пунктов составила более 70%. Определено, что наиболее значимым дозообразующим фактором для населения с повышенными и высокими уровнями облучения за счет ПИИИ является радон в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Первоначальное предположение о том, что основной источник поступления радона в помещения – это вода, поступающая в распределительную сеть из подземных источников водоснабжения, было



**Рис.** Структура средней индивидуальной годовой эффективной дозы природного облучения населения с. Бриент и с. Аландское Кваркенского района

**[Fig.** Structure of the individual average annual effective dose due to natural sources of ionizing radiation to the population of Brient and Alandskoe, Kvarkensky district]

опровергнуто результатами комплексного радиационного обследования [1]. Таким образом, для достижения поставленной в статье цели необходимо было решить вторую задачу – выявить основной источник поступления в здания радона как наиболее значимого дозобразующего фактора для населения с высокими уровнями облучения за счет ПИИИ.

**Результаты исследований по выявлению основного источника поступления радона в здания**

Результаты обследования населенных пунктов в части содержания радона поставили перед исполнителями новую задачу – выявление причин повышенных и высоких значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий.

Поскольку результаты, полученные в ходе измерений содержания радона в воздухе помещений, где не использовалась вода, выявили многократные превышения гигиенического норматива 200 Бк/м<sup>3</sup>, специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева были проведены детальные исследования для выявления основного источника поступления радона в воздух помещений жилых и общественных зданий.

Для определения источников поступления радона в воздух помещений в апреле 2019 г. выборочно были проведены измерения ППР с поверхности грунта вокруг зданий в населенных пунктах с высокими уровнями содержания радона в воздухе помещений. В таблице 2 представлены диапазоны значений ППР в 4 населенных пунктах (гигиенический норматив ППР в соответствии с ОСПОРБ 99/2010 составляет для зданий жилого и общественного назначения 80 мБк/(м<sup>2</sup>×с)).

Полученные результаты с учетом неопределенности показали значительное превышение установленного норматива ППР 80 мБк/(м<sup>2</sup>×с) во всех населенных пунктах, что свидетельствует о наличии в подстилающих грунтах урансодержащих пород.

Для оценки влияния материалов, из которых построены здания, на уровни содержания радона в воздухе помещений был проведен выборочный отбор проб местных

стройматериалов для определения содержания ПРН. А<sub>эфф</sub> ПРН в стройматериалах по данным спектрометрических измерений не превысила гигиенический норматив для материалов I класса, допустимых к применению в строительстве жилых и общественных зданий (370 Бк/кг). В таблице 3 приведены результаты определения А<sub>эфф</sub> ПРН в пробах материалов строительных конструкций здания ФАП пос. Нововинницкое ГБУЗ «Адамовская РБ».

Таблица 3

**Результаты определения эффективной удельной активности ПРН в строительных материалах**

[Table 3]

**Effective activity concentration of natural radionuclides in samples of building materials**

Строительный материал [Building material]	№ образца [Sample No.]	A <sub>эфф</sub> , Бк/кг [A <sub>eff</sub> , Bq/kg]
Кирпич силикатный [Silicate bricks]	1	< 35
	2	< 35
Кирпич красный [Red bricks]	1	120 ± 30
	2	115 ± 30
Цементный раствор [Cement mortar]	1	45 ± 15
	2	45 ± 15

Полученные данные привели к предварительным выводам, что основной причиной высокого содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в отдельных обследованных населенных пунктах является грунт под зданиями (особенно для зданий без подвалов, характерных для сельской местности), но для окончательной определенности требовалось проведение детального исследования всех параметров радиационной обстановки в самом здании и вокруг него; такие исследования были проведены в 4 населенных пунктах Кваркенского и Адамовского районов в октябре 2019 г. (проведение подобных исследований в летний период не является целесообразным, так как в связи с высоким воздухообменом в помещениях (открытые окна) искажается картина поступления радона в здание; в зимний

Таблица 2

**Результаты измерений плотности потока радона с поверхности грунта в обследованных населенных пунктах (апрель 2019 г.)**

[Table 2]

**Density of radon flux from the surface of the ground in the surveyed settlements (April 2019)**

Район, населенный пункт [District, settlement]	ППР, мБк/(м <sup>2</sup> ×с) [Density of radon flux, mBq/(m <sup>2</sup> ×s)]			
	mean	SD	min	max
Адамовский район, с. Аниховка [Adamovsky district, Anikhovka]	78	12	30	137
Адамовский район, п. Белополье [Adamovsky district, Belopol'e]	158	5	137	185
Кваркенский район, с. Екатериновка [Kvarkensky district, Ekaterinovka]	204	48	132	536
Кваркенский район, с. Кваркено [Kvarkensky district, Kvarkeno]	97	11	37	145

mean – среднее значение; SD – среднеквадратичное отклонение среднего; min, max – минимальное и максимальное значения [mean – mean value; SD – standard deviation; min, max – minimum and maximum values.]

период также невозможно получить объективную картину процессов накопления радона в помещениях, так как из-за разницы в промерзании грунта под зданием и вокруг него, а также влияния стек-эффекта (так называемого «эффекта печной трубы») [6] поступление радона из подстилающего грунта значительно усиливается. Наиболее достоверные результаты получаются при проведении исследований в весенне-осенний период, когда тепловой режим помещений близок к нейтральному (нет ни интенсивного проветривания, ни отапливания), а промерзание или переувлажнение грунтов вблизи зданий отсутствует.

Для детального обследования с целью определения источников поступления радона в помещения и оценки значимости вклада каждого источника были выбраны помещения в 4 зданиях общественного назначения (медицинские учреждения – ФАП, амбулатория, поликлиника) в с. Кваркено и с. Аландское (Кваркенский район), с. Аниховка и п. Нововинницкое (Адамовский район), в которых по данным комплексного радиационного обследования были выявлены превышения гигиенического норматива среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе и зарегистрированы одни из самых высоких уровней данного показателя; во всех помещениях был подведен системы центрального водоснабжения (для оценки вклада поступления радона из воды подземных источников).

Детальное радиационное обследование для выявления источников поступления радона в здания включало в себя поисковую гамма-съемку строительных конструкций выбранных помещений и определение содержания ПРН (в том числе  $^{226}\text{Ra}$ ) в материалах строительных конструкций помещения в точках с максимальными показаниями поискового гамма-радиометра с помощью полевого гамма-спектрометра; измерения МАЭД гамма-излучения в помещениях; непрерывный мониторинг ОА и ЭРОА радона в помещениях в разных режимах водопользования

(до включения воды, в процессе водопользования, после выключения воды); мониторинг коэффициента радиоактивного равновесия между радонам и его ДПР  $F_{\text{РН}}$ ; определение УА радона в воде источников подземного водоснабжения, подающейся по распределительной сети населенного пункта; поисковую гамма-съемку, определение МАЭД гамма-излучения, определение ППР с поверхности грунта и ОА радона в почвенном воздухе на прилегающей территории вблизи зданий.

В рамках детального обследования в лабораторных условиях были проведены спектрометрические измерения УА ПРН (в том числе  $^{226}\text{Ra}$ ) и  $A_{\text{эфф}}$  ПРН в пробах материалов строительных конструкций зданий (там, где была возможность отбора проб) и в пробах поверхностного слоя грунта (0–5 см) с прилегающей территории вблизи зданий, отобранных в точках с максимальными показаниями поискового радиометра, а также определены суммарная альфа- и бета-активность воды из разводящей сети, подведенной к помещениям.

Детальное радиационное обследование не выявило превышений гигиенических нормативов МАЭД гамма-излучения в выбранных помещениях и на прилегающей к зданиям территории, а также  $A_{\text{эфф}}$  ПРН в материалах строительных конструкций зданий; УА ПРН в поверхностных слоях грунта (0–5 см) соответствовали диапазонам значений, характерным для данного типа почв [7] (табл. 4).

Вместе с тем, ППР радона с поверхности грунта вблизи всех 4 зданий (табл. 5) превышает установленное нормативными документами значение 80 Бк/(м<sup>2</sup>·с), при этом в отдельных точках наблюдается более чем 10-кратное превышение норматива (904 Бк/(м<sup>2</sup>·с) в п. Нововинницкое).

Такой радиологический показатель, как ОА радона в почвенном воздухе, не нормируется в санитарном законодательстве Российской Федерации, но определен как дополнительный признак потенциальной радоноопас-

Результаты измерений удельной активности ПРН в пробах поверхностного слоя грунта (0–5 см)

Таблица 4

[Table 4

Activity concentrations of natural radionuclides in topsoil samples (0–5 cm)]

Место отбора пробы [Sampling site]	№ образца [Sample No.]	Удельная активность, Бк/кг [Activity concentration, Bq/kg]		
		$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{40}\text{K}$
Территория, прилегающая к зданию ФАП пос. Нововинницкое ГБУЗ «Адамовская РБ» [Novovinnitskoe, paramedic station, adjacent area]	1	50 ± 20	40 ± 15	750 ± 150
	2	55 ± 20	40 ± 15	710 ± 140
	3	50 ± 20	45 ± 20	700 ± 140
Территория, прилегающая к зданию амбулатории с. Аниховка ГБУЗ «Адамовская РБ» [Anikhovka, paramedic station, adjacent area]	1	20 ± 10	15 ± 10	340 ± 100
	2	20 ± 10	10 ± 5	350 ± 105
	3	20 ± 10	15 ± 10	350 ± 105
Территория, прилегающая к зданию ФАП с. Аландское ГАУЗ «Кваркенская РБ» [Alandskoe, paramedic station, adjacent area]	1	30 ± 15	30 ± 15	530 ± 160
	2	30 ± 15	25 ± 15	550 ± 165
	3	35 ± 15	30 ± 15	530 ± 160
Территория, прилегающая к зданию поликлиники ГАУЗ «Кваркено, поликлиника, adjacent area]	1	35 ± 15	25 ± 15	390 ± 115

Результаты измерений плотности потока радона с поверхности грунта в обследованных населенных пунктах (октябрь 2019 г.)

Таблица 5

[Table 5]

Район, населенный пункт [District, settlement]	ППР, мБк/(м <sup>2</sup> ×с) [Density of radon flux, mBq/(m <sup>2</sup> ×s)]			
	mean	SD	min	max
Адамовский район, с. Аниховка [Adamovsky district, Anikhovka]	148	30	6	295
Адамовский район, п. Нововинницкое [Adamovsky district, Novovinnitskoe]	377	101	49	904
Кваркенский район, с. Аландское [Kvarkensky district, Alandskoe]	252	33	154	460
Кваркенский район, с. Кваркено [Kvarkensky district, Kvarkeno]	92	6	55	122

mean – среднее значение; SD – среднеквадратичное отклонение среднего; min, max – минимальное и максимальное значения [mean – mean value; SD – standard deviation; min, max – minimum and maximum values.]

ности территории<sup>8</sup>, поэтому для трактовки его значений была использована классификация уровней радоноопасности, установленная в Швеции для земельных участков под застройку [8]). В соответствии с ней высокий уровень радоноопасности (ОА радона в почвенном воздухе более 50 кБк/м<sup>3</sup>) зафиксирован в 3 из 4 обследованных населенных пунктов (табл. 6).

УА радона в воде из распределительной сети населенных пунктов на момент проведения исследований составила в с. Кваркено 240±72 Бк/кг, в с. Аландское – 55±17 Бк/кг, в с. Аниховка – 705±211 Бк/кг, в п. Нововинницкое – 280±84 Бк/кг. Таким образом, уровень вмешательства по <sup>222</sup>Rn, равный 60 Бк/кг, превышен в 3 из 4 обследованных

населенных пунктов, а в с. Аниховка, в частности, – более чем в 11 раз.

Мониторинг коэффициента радиоактивного равновесия между радонотом и его ДПР  $F_{Rn}$  для оценки воздухообмена в помещениях показал очень низкие (на уровне 0,2) значения этого показателя, что свидетельствует о постоянном притоке в помещения воздушных масс, хотя окна в помещениях на время проведения эксперимента были плотно закрыты, а двери приоткрывались на короткое время только для входа-выхода людей. Наиболее вероятный источник притока воздуха в помещение – из-под пола в местах ввода коммуникаций и по трещинам строительных конструкций.

Результаты измерений ОА радона в почвенном воздухе в обследованных населенных пунктах (октябрь 2019 г.)

Таблица 6

[Table 6]

Район, населенный пункт [District, settlement]	ОА радона в почвенном воздухе, кБк/м <sup>3</sup> [Soil gas radon concentration, kBq/m <sup>3</sup> ]			
	mean	SD	min	max
Адамовский район, с. Аниховка [Adamovsky district, Anikhovka]	98,247	22,187	60,506	162,515
Адамовский район, п. Нововинницкое [Adamovsky district, Novovinnitskoe]	182,863	59,157	97,621	355,396
Кваркенский район, с. Аландское [Kvarkensky district, Alandskoe]	131,984	15,592	97,408	172,352
Кваркенский район, с. Кваркено [Kvarkensky district, Kvarkeno]	34,279	2,736	30,106	42,192

mean – среднее значение; SD – среднеквадратичное отклонение среднего; min, max – минимальное и максимальное значения [mean – mean value; SD – standard deviation; min, max – minimum and maximum values.]

<sup>8</sup> Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2398-08. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 02.07.2008 г. Пункт 6.13 [Radiation control and sanitary and epidemiological assessment of land sites for construction of residential, public and industrial buildings and facilities. Guidelines MU 2.6.1.2398-08. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 02.07.2008. (In Russ.) Paragraph 6.13.]

Мониторинг ОА и ЭРОА радона в помещениях не выявил ярко выраженной связи пользования водой в помещении с ростом содержания радона в воздухе, который продолжался и после выключения воды, что говорит о преимущественном поступлении радона в помещение из другого источника.

Результаты выполненного детального обследования помещений в 4 зданиях общественного назначения с высокими уровнями содержания радона в Кваркенском и Адамовском районах однозначно свидетельствуют, что основным источником поступления радона в воздух помещений жилых и общественных зданий в обследованных населенных пунктах является подстилающий грунт под зданиями (а с учетом строительных характеристик большинства зданий радон свободно проникает в помещения); вклад воды из системы водоснабжения как источника поступления радона в воздух помещений является незначительным по сравнению со вкладом основного источника.

### Заключение

Оценка доз природного облучения населения в 6 районах восточной части Оренбургской области (Адамовском, Домбаровском, Кваркенском, Новоорском, Светлинском районах и Ясенском ГО) показала, что только в 9 из 34 обследованных населенных пунктов средние дозы облучения жителей за счет ПИИИ по классификации ОСПОРБ 99/2010 соответствуют приемлемому уровню природного облучения (не превышают 5 мЗв/год). Население 18 населенных пунктов получает повышенные (в интервале от 5 до 10 мЗв/год) дозы облучения за счет ПИИИ; 7 населенных пунктов – высокие (свыше 10 мЗв/год). Для отдельных жителей дозовая нагрузка может превышать значение 10 мЗв/год в десятки раз.

Основным дозообразующим фактором и причиной повышенного и высокого природного облучения жителей 25 населенных пунктов Адамовского, Домбаровского, Кваркенского, Светлинского районов и Ясенского ГО во всех проанализированных случаях является радон, поступающий в помещения из грунта под зданиями; вклад воды из системы водоснабжения как источника поступления радона в воздух помещений является незначительным по сравнению со вкладом основного источника.

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

Кормановская Т.А. разработала дизайн исследования, определила цели и задачи, руководила выполнением полевых исследований, выполнила расчет доз, написала черновик рукописи и представила окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Романович И.К. осуществлял общее научное руководство исследованием, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Вяльцина Н.Е. организовала проведение полевых исследований на региональном уровне, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Гаевой С.В. организовал проведение полевых исследований на районном уровне, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кононенко Д.В. участвовал в выполнении полевых исследований, провел статистическую обработку результатов измерений, подготовил рисунки и таблицы, английский

перевод и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. участвовал в выполнении полевых исследований, подготовил описание материалов и методов исследования, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кокоулина Е.С. участвовала в выполнении полевых исследований, выполнила спектрометрические измерения и анализ их результатов, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Королева Н.А. провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала 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 выполнена в рамках Государственного контракта на проведение научно-исследовательской работы «Комплексное радиационное обследование и гигиеническая оценка уровней облучения населения восточных районов Оренбургской области за счет использования питьевой воды подземных источников водоснабжения» № 03-21/38 (0853500000319000268) от 9 апреля 2019 г.

### Литература

1. Т.А. Кормановская, И.К. Романович, Н.Е. Вяльцина, 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. 89–101. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-89-101.
2. Кормановская Т.А., Романович И.К., Сапрыкин К.А., и др. Обеспечение радиационной безопасности населения восточных районов Оренбургской области при использовании питьевой воды из подземных источников водоснабжения // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 87–97. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-87-97.
3. Романович И.К., Статат И.П., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия. Под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
4. Киселев С.М., Жуковский М.В., Статат 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.
5. Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В., и др. Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 29–40. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.
6. Жуковский М.В., Кружалов А.В., Гурвич В.Б., Ярмошенко И.В. Радонная безопасность зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 180 с.
7. Пономарёва И.С. Биологический круговорот радионуклидов и динамика лейкоза коров в Оренбуржье // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48, № 5. С. 606–610.
8. Åkerblom G. Investigations and mapping of radon risk areas // Geology for Environmental Planning. Geological Survey of Norway, Special papers 2, 1987. P. 96–106.

Поступила: 05.04.2023 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

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

**Вяльцина Наталья Ефимовна** – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Оренбургской области, Оренбург, Россия

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

**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 <https://orcid.org/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

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

**Королева Надежда Андреевна** – старший 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

**Для цитирования:** Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е., Гаевой С.В., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А., Кокоулина Е.С., Королева Н.А. 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

---

## 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

Tatyana A. Kormanovskaya <sup>1</sup>, Ivan K. Romanovich <sup>1</sup>, Natalya E. Vyaltina <sup>2</sup>, Sergey V. Gaevoy <sup>2</sup>, Dmitry V. Kononenko <sup>1</sup>, Kirill A. Saprykin <sup>1</sup>, Elena S. Kokoulina <sup>1</sup>, Nadezhda A. Koroleva <sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Orenburg region, Orenburg, Russia

*The paper presents the estimated doses to the population of six eastern districts of the Orenburg region, Russia, based on the results of a comprehensive radiation survey conducted in 2019 in 34 settlements with previously found elevated levels of activity concentration of natural radionuclides in tap water from ground-*

---

**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

water sources of drinking water supply. It is shown that the average individual annual effective dose due to all natural sources of ionizing radiation in 18 of 34 settlements corresponds to 'elevated level' of exposure due to natural sources according to established classification (from 5 to 10 mSv/year), and in another 7 settlements to 'high level' (over 10 mSv/year) with radon being the main contributor to the dose. Four settlements of Kvarkensky and Adamovsky districts, where the highest indoor radon concentrations had been found, were selected for a detailed survey, which included measurements of density of radon flux from the soil, radon concentration in soil gas, activity concentration of natural radionuclides in samples of building materials and in soil samples, and activity concentration of radon in tap water from groundwater sources of drinking water supply. Results of the detailed survey proved that the main source of radon in the buildings was the soil gas infiltration; compared to it, the contribution of waterborne radon release was insignificant.

**Key words:** natural sources of ionizing radiation, natural radionuclides, radon, groundwater sources, drinking water, density of radon flux, soil gas, ambient dose equivalent rate, Orenburg region.

### Personal contribution of the authors

Kormanovskaya T.A. developed the design of the survey, defined the goals and objectives, supervised the field research, assessed the doses, wrote the draft of the manuscript, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Romanovich I.K. provided general scientific management of the project and edited the interim version of the manuscript.

Vyaltsina N.E. organized field research at the regional level and edited the interim version of the manuscript.

Gaevoy S.V. organized field research at the local level and edited the interim version of the manuscript.

Kononenko D.V. participated in the field research, conducted statistical analysis of the results, prepared figures and tables, translated the manuscript and edited the interim version of the manuscript.

Saprykin K.A. participated in the field research, prepared the description of materials and methods, and edited the interim version of the manuscript.

Kokoulina E.S. participated in the field research, made gamma spectrometric measurements and analyzed the results, and edited an interim version of the manuscript.

Koroleva N.A. searched and analyzed literature data, 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 was carried out within the framework of the State Contract for conducting research work "Comprehensive radiation survey and hygienic assessment of levels of public exposure in the eastern districts of the Orenburg region due to the use of drinking water from underground water sources" No. 03-21/38 (085350000319000268).

### 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): 89–101. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-89-101. (In Russian).
2. Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Saprykin KA, Vyaltsina NE, Gaevoy SV, Konovalov VYu, et al. Provision of the radiation safety of the public of the eastern districts of the Orenburg region for the use of the drinking water from the underground water supply sources. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 87–97. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-87-97. (In Russian).
3. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2018. 432 p. (In Russian).
4. Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon. From fundamental research to regulatory practice. Moscow: Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical; 2016. 432 p.
5. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40. (In Russian).
6. Zhukovsky MV, Krushalov AV, Gurchich VB, Yarmoshenko IV. Radon safety of buildings. Ekaterinburg: UB RAS; 2000. 180 p. (In Russian).
7. Ponomaryova IS. Biological Radionuclides Cycle and Dynamics of Cattle Leucosis in the Orenburg Region. *Radiacionnaya biologiya. Radiojekonomika = Radiation Biology. Radioecology*. 2008;48(5): 606–610. (In Russian).
8. Åkerblom G. Investigations and mapping of radon risk areas. In: *Geology for Environmental Planning*. Geological Survey of Norway, Special papers 2; 1987. P. 96–106.

Received: April 05, 2023

**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, Russian Federation; E-mail: f4dos@mail.ru)

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

**Natalya E. Vyaltsina** – Head of the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Orenburg region, Chief sanitary doctor of the Orenburg region, Orenburg, Russia

**Sergey V. Gaevoy** – Head of the Department of the surveillance on transport, working conditions and radiation hygiene, Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Orenburg region, Orenburg, Russia

**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  <https://orcid.org/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

**Elena S. Kokoulina** – Leading research engineer, Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

**Nadezhda A. Koroleva** – Senior 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

**For citation: Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Vyaltsina N.E., Gaevoy S.V., Kononenko D.V., Saprykin K.A., Kokoulina E.S., Koroleva N.A. 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. Vol. 16, No. 2. P. 7-18. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-7-18**

## Совершенствование подхода к определению радиологических критериев выписки пациентов после радионуклидной терапии

Л.А. Чипига<sup>1,2,3</sup>, И.А. Звонова<sup>1</sup>, А.В. Водоватов<sup>1,4</sup>, А.В. Петрякова<sup>1,5</sup>, А.А. Станжевский<sup>2</sup>,  
Д.А. Важенина<sup>2</sup>, М.Я. Смолярчук<sup>6,7</sup>, С.А. Рыжов<sup>8,9,10</sup>

<sup>1</sup> 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

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

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

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Городская больница № 40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

<sup>6</sup> ООО «Медицина и ядерные технологии», Москва, Россия

<sup>7</sup> МОО «Общество ядерной медицины», Москва, Россия

<sup>8</sup> Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Россия

<sup>9</sup> Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

<sup>10</sup> Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

*Установленные в НРБ-99/2009 радиологические критерии выписки пациентов после радионуклидной терапии относятся только к четырём радионуклидам, которые использовались в Российской Федерации в период подготовки документа. Рассчитанные только с учётом радиоактивного распада радионуклида-метки, они дают консервативные оценки, которые требуют пребывания пациента в «активных» палатах радиотерапевтического отделения несколько дней и не позволяют проводить радионуклидную терапию пациентам в режиме дневного стационара, что безусловно снижает доступность этого вида лечения. Учет биологического выведения радиофармпрепарата из организма пациента может существенно смягчить критерии выписки пациентов после терапии. В последнее время появились новые перспективные радионуклиды и радиофармпрепараты для терапии, внедрение которых в медицинскую практику тормозится отсутствием критериев выписки пациентов. Настоящая работа посвящена обоснованию подхода к определению радиологических критериев выписки пациентов после радионуклидной терапии для перспективных и применяемых радиофармацевтических лекарственных препаратов с учётом их биологического выведения из организма пациента. В качестве примера расчёты критериев выписки пациентов выполнены для <sup>177</sup>Lu-ПСМА, <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ТАТЕ, <sup>131</sup>I-МИБГ и Na<sup>131</sup>I. Для расчётов использовалась дозиметрическая модель, на основании которой определены действующие радиологические критерии выписки пациентов, вошедшие в НРБ-99/2009. Дополнительно учитывалось биологическое выведение радионуклида в РФЛП из организма пациента, которое оценивалось по данным из опубликованных работ. Для рассматриваемых препаратов характерно две фракции выведения (быстрая и медленная). Основной вклад в снижение активности радионуклида в теле пациента происходит в первые часы после введения РФЛП – быстрая фракция; за 4-6 часов после введения около 50% этих препаратов выводятся с мочой. Для расчёта критериев выписки использовались медленные фракции выведения, которые характеризуют снижение активности в теле после выписки пациента. Используются следующие значения эффективного периода полувыведения для <sup>177</sup>Lu-ПСМА – 60 часов, для <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ТАТЕ – 100 часов, для <sup>131</sup>I-МИБГ – 45 часов, для Na<sup>131</sup>I – 7,5 сут. Выполненные расчёты показывают, что при планировании курса терапии с четырьмя сеансами введения радиофармпрепарата <sup>177</sup>Lu-ПСМА допускается выписка при мощности дозы 20 мкЗв/ч от пациента на расстоянии 1 м, при терапии с <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ТАТЕ допускается выписка при 12 мкЗв/ч. Учитывая быстрое выведение*

**Чипига Лариса Александровна**

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

*РФЛП из организма пациента в первые часы после введения, можно предполагать, что большему числу пациентов с нормальной функцией почек возможно проводить РНТ с  $^{177}\text{Lu}$ -ПСМА в условиях дневного стационара. Отдельные пациенты после введения  $^{177}\text{Lu}$ -ПСМА и пациенты при терапии с  $^{177}\text{Lu}$ -ДОТА-ТАГЕ могут быть задержаны в отделении в «активной палате» на 1–2 суток до снижения мощности дозы от пациента до допустимых уровней. Для препарата  $^{131}\text{I}$ -МИБГ учет биологического выведения радионуклида в РФЛП позволяет смягчить критерий выписки в четыре раза, а для  $\text{Na}^{131}\text{I}$  – на 10% что позволит раньше выписывать пациента из отделения радионуклидной терапии, и повысит пропускную способность отделений радионуклидной терапии, без снижения уровня радиационной безопасности населения и членов семьи пациента.*

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

### Введение

Широкое внедрение технологий радионуклидной терапии (РНТ) в Российской Федерации происходит в рамках реализации национального проекта «Здравоохранение» и федерального проекта «Борьба с онкологическими заболеваниями».

Особенность радионуклидной терапии с точки зрения радиационной безопасности связана с возможностью облучения окружающих людей при контакте с пациентом после введения терапевтического радиофармацевтического лекарственного препарата (РФЛП), например, в общественном транспорте или дома. Согласно общепринятому подходу, обеспечение радиационной безопасности населения основано на ограничении значений мощности дозы, при которых пациент может быть выписан из медицинской организации (так называемых радиологических критериев выписки) [1–7]. Радиологические критерии выписки направлены на не превышение установленных дозовых критериев внешнего облучения для населения и для лиц, осуществляющих уход за пациентом (1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год)<sup>1</sup> [1,4].

Согласно отечественным нормативным документам<sup>2</sup>, пациенты, проходящие курс РНТ, могут быть выписаны из отделения при уровне гамма- и рентгеновского излучения, испускаемого из тела, равном или ниже радиологического критерия выписки. В СанПиН 2.6.1.2368-08 прописан единый для всех радионуклидов критерий выписки пациентов по мощности дозы фотонного излучения на расстоянии 1 м от пациента – 3 мкЗв/ч, который является предельно консервативным. В 2009 г. были разработаны и утверждены в НРБ-99/2009 специфические критерии выписки для ряда радионуклидов, применяемых в РНТ:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{188}\text{Re}$  и для  $^{125}\text{I}$  в составе имплантов для тканевой брахитерапии. Обновленные критерии выписки регламентируют значения мощности дозы гамма- и рентгеновского излучения на расстоянии 1 м от пациента и соответствующую величину активности радионуклида, при которых обеспечивается не превышение годового предела дозы у окружающих пациента лиц. Значение активности в теле пациента в критериях выписки позволяет спланировать время нахождения пациента в отделении радионуклидной терапии.

Фактическая выписка пациентов осуществляется по результатам измерения мощности дозы гамма-излучения на расстоянии 1 м от пациента и сопоставления полученного значения с соответствующим критерием. Установленные специфические критерии выписки учитывают снижение активности в теле пациента и мощности дозы за счет радиоактивного распада радионуклида, входящего в состав РФЛП [1]. В случае проведения курса РНТ, состоящего из нескольких введений РФЛП, значения критериев выписки по мощности дозы и вводимой/остаточной активности радионуклида в теле пациента необходимо снизить в число раз, равное числу введений РФЛП.

Установленные в НРБ-99/2009 радиологические критерии выписки относятся только к тем радионуклидам, которые широко использовались в практике РНТ во время подготовки документа, и не включают ряд перспективных радионуклидов, которые в настоящее время уже применяются в отечественной практике. Помимо этого, методика определения критериев выписки основана на упрощенной дозиметрической модели, учитывающей только радиоактивный распад [1]. Использованная дозиметрическая модель не учитывает снижение активности радионуклида в теле пациента за счет биологического выведения РФЛП из организма и соответствующее снижение излучения от пациента, которое является специфичным для каждого РФЛП. Это приводит к излишней консервативности данных критериев, неоправданно снижает пропускную способность медицинской организации и лишает часть пациентов возможности получения данного вида высокотехнологического лечения. В 2015 г. на основании уже описанной дозиметрической модели Наркевич Б.Я. и Лысак Ю.В. [8] определили радиологические критерии выписки пациентов для 29 перспективных для терапии радионуклидов, при этом также не учитывалось биологическое выведение РФЛП из организма пациентов.

Отсутствие специфических критериев выписки для перспективных радионуклидов и РФЛП также тормозит их применение в медицинских организациях в режиме дневного стационара. Например, отсутствие критериев выписки для препаратов на основе простат-специфического мембранного антигена (ПСМА) для терапии рака

<sup>1</sup> НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности. СанПиН 2.6.1.2523-09 [Norms of the Radiation Safety NRB- 99/2009 (In Russ.)]

<sup>2</sup> НРБ-99/2009. [NRB- 99/2009], СанПиН 2.6.1.2368–08. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников. М.: Роспотребнадзор, 2008. 99 с. [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2368–08 «Hygienic requirements for radiation safety during radiation therapy using open radionuclide sources». Moscow: Rosпотребнадзор; 2008. 99 p. (In Russ.)]

предстательной железы и пептидов для лечения нейроэндокринных опухолей, меченных <sup>177</sup>Lu [9, 10], существенно препятствует развитию отечественной ядерной медицины и ограничивает оказание полноценной онкологической помощи населению.

**Цель исследования** – обоснование необходимости совершенствования подхода к определению радиологических критериев выписки пациентов после радионуклидной терапии для перспективных и применяемых РФЛП (на примере РФЛП, меченных <sup>177</sup>Lu и <sup>131</sup>I).

**Материалы и методы**

За основу была взята используемая дозиметрическая модель, на основании которой определены действующие радиологические критерии выписки пациентов после радионуклидной терапии, вошедшие в НРБ-99/2009, и которая детально описана в научной литературе [1, 2]. Данная дозиметрическая модель учитывает радиационные характеристики радионуклидов (А – активность радионуклида в теле пациента, Г – гамма-постоянная радионуклида), время контакта окружающих лиц с пациентом (OF), а также снижение активности радионуклида в теле пациента за счет радиоактивного распада (Т – период полураспада радионуклида) и поглощение излучения в теле пациента (AF – доля излучения, поглощаемая в теле пациента, принимается равной 0 при средней энергии спектра гамма-излучения радионуклида выше 100 кэВ) и в теле окружающих лиц (СС – коэффициент перехода от погло-

щенной дозы к эффективной дозе, принимается равным 1 при средней энергии спектра гамма-излучения радионуклида выше 100 кэВ). Согласно модели, активность в теле пациента моделируется точечным источником, а мощность поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от пациента описывается выражением (1):

$$\dot{D} = A \cdot \Gamma \cdot (1 - AF_{E_\gamma}), \text{ мкГр/ч.} \quad (1)$$

Эффективная доза у лиц, окружающих пациента после выписки, описывается выражением (2):

$$E = 34,6 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{D} \cdot T \cdot OF \cdot CC_{E_\gamma}, \text{ мЗв.} \quad (2)$$

Размерность параметров в формулах (1) и (2) приведена в таблице 1.

В настоящей работе дополнительно было учтено биологическое выведение радионуклида в РФЛП из организма пациента. Для этого вместо периода полураспада радионуклида в уравнении (2) применялся эффективный период полувыведения, который учитывает биологическое выведение РФЛП из организма пациента и радиоактивный распад радионуклида ( $\frac{1}{T_{эф}} = \frac{1}{T_{био}} + \frac{1}{T_p}$ ). В качестве примера расчёты выполнены для <sup>177</sup>Lu-ПСМА, <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ТАТЕ, <sup>131</sup>I-МИБГ и Na<sup>131</sup>I.

Радиационные характеристики <sup>177</sup>Lu и <sup>131</sup>I были взяты из Публикации МКРЗ 107 [11]. Для оценки биологического выведения РФЛП из организма использовались данные из опубликованных работ (табл. 2) [12–23].

Таблица 1  
Параметры дозиметрической модели для <sup>177</sup>Lu-ПСМА-617 и <sup>131</sup>I-МИБГ (формула 1)

[Table 1]

**Dosimetric model parameters for <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 и <sup>131</sup>I-mIBG]**

Параметр модели [Model parameter]	<sup>177</sup> Lu-ПСМА [177Lu-PSMA-617]	<sup>177</sup> Lu-ДОТА-ТАТЕ [177Lu-DOTA-TATE]	<sup>131</sup> I-МИБГ [131I-mIBG]	Na <sup>131</sup> I	
Г	Гамма-постоянная, мкГр·м <sup>2</sup> /(ГБк·ч) [Point source air kerma coefficient, μGy·m <sup>2</sup> /(GBq·h)]	4,75		52,2	
E <sub>γ</sub>	Средняя энергия гамма спектра, кэВ [Mean energy of gamma rays, keV]	175		378	
T <sub>физ</sub>	Период полураспада, сут [Half-life, d]	6,7		8,02	
T <sub>эфф</sub>	Эффективный период полувыведения, ч [Effective half-life, h]	60	100	45	180
OF	Доля времени пребывания окружающих лиц с пациентом [Percentage of time spent with patient]	Взрослые, осуществляющие уход за пациентом [Carers] 0,3 (7 ч/сут) [(7 h/day)]			
		Население, в том числе и дети, контактирующие с пациентом [General public including children in contact with patient] 0,15 (3-4 ч/сут) [(3-4 h/day)]			
AF <sub>E<sub>γ</sub></sub>	Фактор поглощения излучения в теле пациента [Radiation absorption factor in patient's body]		0		
CC <sub>E<sub>γ</sub></sub>	Коэффициент перехода от поглощенной дозы к эффективной дозе у окружающих лиц, Зв/Гр [Conversion factor from absorbed dose to effective dose, Sv/Gy]		1		
–	Предел дозы для облучаемых лиц, мЗв/год [Dose limit, mSv/y]	Взрослые, осуществляющие уход за пациентом [Carers] 5			
		Население, в том числе и дети, контактирующие с пациентом [General public including children in contact with patient] 1			

Таблица 2

Фармакокинетические свойства РФЛП для оценки биологического выведения из организма

[Table 2]

Pharmacokinetic characteristics of radiopharmaceuticals for assessment of biological excretion

РФЛП [Radio-pharmaceutical]	Вводимые активности, ГБк [Administered activity, GBq]	Источник [Reference]	Выведенная активность, % от введения [Excretion activity, % of the administered activity]	Эффективный период полувыведения [Effective half-life]	Мощность дозы, мкЗв/ч [Dose rate, μSv/h]
<sup>177</sup> Lu-ПСМА-617 [ <sup>177</sup> Lu-PSMA-617]	6,3	Kurth et al. [12]	4 ч – [h] 50±8% 12 ч [h] – 70±7%	T <sub>эф1</sub> = 1,7±0,8 ч [h] T <sub>эф2</sub> = 41±9 ч [h]	На расстоянии 2 м [at 2 m from patient] 2 ч [h] – 3,6±0,7 24 ч [h] – 1,6±0,6 48 ч [h] – 1,1±0,5 72 ч [h] – 0,7±0,4
	7,4	Demir et al. [13]	6 ч [h] – 45%	T <sub>эф2</sub> = 33 ч [h]	На расстоянии 2 м [at 2 m from patient] 2 ч [h] – 17±6 4 ч [h] – 11±4 24 ч [h] – 3±1 48 ч [h] – 1±0,3 На расстоянии 1 м [at 1 m from patient]
	6,5 (3,5–9,0)	Schuchardt et al. [14]	–	T <sub>эф2</sub> = 42 ч [h]	–
	5 – 10	Крылов и др. [15]	48 ч [h] – 34–89%	–	–
РФЛП [Radio-pharmaceutical]	Вводимые активности, ГБк [Administered activity, GBq]	Источник [Reference]	Выведенная активность, % от введения [Excretion activity, % of the administered activity]	Эффективный период полувыведения [Effective half-life]	Мощность дозы, мкЗв/ч [Dose rate, μSv/h]
<sup>177</sup> Lu-ПСМА-I&T [ <sup>177</sup> Lu-PSMA-I&T]	6,1 (3,4–7,6)	Schuchardt et al. [14]	–	T <sub>эф2</sub> = 35 ч [h]	–
<sup>177</sup> Lu-ДОТА-TATE [ <sup>177</sup> Lu-DOТА-TATE]	5,5	Wehrmann et al. [16]	4 ч [h] – 38% 20 ч [h] – 70% 48 ч [h] – 80%	T <sub>эф1</sub> = 2,5±0,9 ч [h] T <sub>эф2</sub> = 56±11 ч [h]	–
	7	Levart et al. [17]	24 ч [h] – 67% 96 ч [h] – 83%	T <sub>эф1</sub> = 4,7±1,4 ч [h] T <sub>эф2</sub> = 87±15 ч [h]	На расстоянии 1 м [at 1 m from patient] 5 ч [h] – 15±3 18 ч [h] – 7±3
<sup>131</sup> I-МИБГ [ <sup>131</sup> I-mIBG]	4–11 [20]	Jacobsson et al. [18]	24 ч [h] – 60% 48 ч [h] – 80%	T <sub>эф1</sub> = 3 ч [h] T <sub>эф2</sub> = 28±8 ч [h]	–
Na <sup>131</sup> I	Онкология: 1,1–14 [3] Тиреотоксикоз: 0,2–0,8	[3, 19, 21,22]	24 ч [h] – 50–60% [3]	T <sub>эф1</sub> = 8 ч [h] T <sub>эф2</sub> = 5,5–7,5 сут [d] [19,21,22]	Онкология: на расстоянии 1 м (введено 5,5 ГБк) [23] [Cancer: at 1 m from patient (administered activity: 5,5 GBq)] 0 ч [h] – 250 24 ч [h] – 100 48 ч [h] – 40 96 ч [h] – 10

Препараты, меченные  $^{177}\text{Lu}$ , которые применяют в РНТ, обладают общими фармакокинетическими свойствами: благодаря малым размерам молекул они быстро (в пределах 15–20 мин) распределяются по объёму крови, активно захватываются специфическими рецепторами раковой опухоли и одновременно быстро выводятся с мочой: через 4–6 ч введенная активность в теле пациента уменьшается примерно вдвое ( $T_{\text{эф1}}$ ). Далее скорость выведения из организма снижается, так как она определяется процессом высвобождения с поверхности опухолевых клеток и из других органов и тканей, которые захватывают РФЛП ( $T_{\text{эф2}}$ ). Скорость выведения  $^{177}\text{Lu}$ -ПСМА характеризуется средним эффективным периодом полувыведения из тела пациента около 40 ч;  $^{177}\text{Lu}$ -ДОТА-ТАТЕ выводится медленнее со средним периодом от 56 до 87 ч в разных исследованиях. Среднеквадратичное отклонение этих оценок составляет примерно 20% от среднего значения.

Опубликованные данные о фармакокинетике  $^{131}\text{I}$ -МИБГ демонстрируют достаточно быстрое вымывание данного РФЛП из крови: 50–70% от введенной дозы экскретируется с мочой в течение 24 ч [24]. Выведение из организма пациента происходит с двумя скоростями: быстрая фракция (0,36) имеет период биологического полувыведения 3 ч, медленная фракция (0,63) – 1,4 дня [18, 19]. Фармакокинетика  $\text{Na}^{131}\text{I}$ , который используется для лечения рака щитовидной железы и тиреотоксикоза, характеризуется медленной фракцией выведения  $^{131}\text{I}$  из организма, обусловленной секрецией  $^{131}\text{I}$  из щитовидной железы в составе тиреоидных гормонов, со скоростью биологического выведения 80–100 сут. Для пациентов с тиреотоксикозом характерен высокий захват  $^{131}\text{I}$  щитовидной железой и ускоренное выведение его из железы в составе тиреоидных гормонов с периодом биологического полувыведения до 15–20 сут (соответственно,  $T_{\text{эф2}}$  около 5,5 сут) [21, 22].

Для определения радиологических критериев выписки пациентов большее значение имеет медленная фаза выведения РФЛП (после выписки пациента из отделения РНТ), поэтому для рассмотренных РФЛП в работе использовалась медленная фракция выведения РФЛП из организма.

Индивидуальные оценки биологического выведения активности радионуклидов из организма пациента имеют большой разброс даже в рамках одного исследования [12, 16, 17]. Использование средних значений скоростей выведения может привести к превышению допустимого предела дозы у окружающих лиц, контактирующих примерно с 50% пациентов. Если взять в расчёт среднее значение плюс два среднеквадратичных отклонения, то в этот интервал попадают 95% измеренных пациентов, тем самым рассчитанный критерий выписки обеспечит радиационную безопасность окружающих лиц. Таким образом, для расчёта критериев выписки пациентов после РНТ использовали следующие значения эффективного периода полувыведения для  $^{177}\text{Lu}$ -ПСМА – 60 ч, для  $^{177}\text{Lu}$ -ДОТА-ТАТЕ – 100 ч, для  $^{131}\text{I}$ -МИБГ – 45 ч, для  $\text{Na}^{131}\text{I}$  – 7,5 сут.

Рассматривались два сценария:

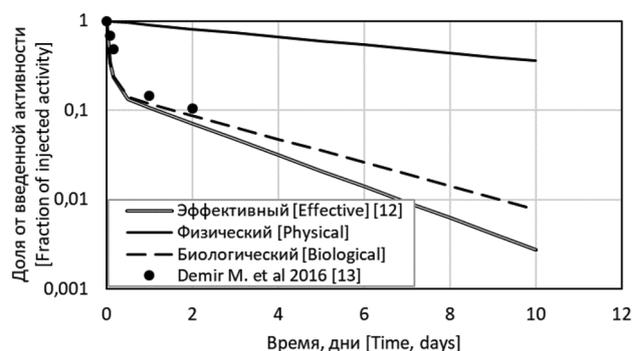
- облучение взрослых лиц, осуществляющих уход за пациентом;
- облучение отдельных лиц из населения, в том числе и детей, контактирующих с пациентом.

Параметры модели, использованные для расчёта критериев выписки пациентов после терапии с введением

$^{177}\text{Lu}$ -ПСМА,  $^{177}\text{Lu}$ -ДОТА-ТАТЕ,  $^{131}\text{I}$ -МИБГ и  $\text{Na}^{131}\text{I}$  приведены в таблице 1.

### Результаты и обсуждение

Снижение активности  $^{177}\text{Lu}$  в теле пациента после введения  $^{177}\text{Lu}$ -ПСМА за счет распада радионуклида, за счет биологического выведения РФЛП, а также суммарное выведение приведено на рисунке [12, 13]. Видно, что основной вклад в снижение активности радионуклида в первые часы после введения РФЛП вносит биологическое выведение. Например, через 4 ч после введения РФЛП за счет физического распада радионуклида активность  $^{177}\text{Lu}$  в теле снизится на 2%, а с учётом биологического выведения – на 50%.



**Рис.** Снижение активности  $^{177}\text{Lu}$  в теле пациента после введения  $^{177}\text{Lu}$ -ПСМА-617 с учетом радиоактивного распада радионуклида, его биологического выведения из организма пациента с РФЛП и суммарное (эффективное) снижение активности [12, 13]

**[Fig.]** Decrease of  $^{177}\text{Lu}$  in patient's body after injection of  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA-617 considering radionuclide half-life, biological excretion, and cumulative (effective) half-life [12, 13]

Выведение РФЛП из организма пациента приводит к образованию радионуклидов в отходах пациентов [25, 26]. С точки зрения радиационной безопасности населения целесообразно, чтобы первые часы после введения РФЛП пациент проводил в отделении РНТ. Отходы пациентов во время нахождения их в отделении РНТ должны собираться и выдерживаться до снижения уровня удельной активности радионуклидов до допустимых значений. Для пациентов, проходящих лечение в условиях дневного стационара, рекомендовано пребывание пациентов в отделении РНТ не менее 4–6 ч. Нахождение пациентов в отделении РНТ во время фазы быстрого выведения РФЛП обеспечивает сбор биологических радиоактивных отходов от пациентов для их выдержки в резервуарах спецканализации в отделениях РНТ. Такой подход обеспечивает снижение активности радионуклидов, попадающих в бытовые системы канализации и водоотведения, и снижает облучение лиц из населения.

С использованием консервативных оценок эффективных периодов полувыведения были определены уровни остаточной активности в теле и мощности дозы на расстоянии 1 м от пациента после введения им  $^{177}\text{Lu}$ -ПСМА,  $^{177}\text{Lu}$ -ДОТА-ТАТЕ и  $^{131}\text{I}$ -МИБГ при выписке из отделения РНТ, обеспечивающие не превышение годового предела дозы у окружающих лиц за счет внешнего облучения (радиологические критерии выписки пациентов) (табл. 3).

Таблица 3

Остаточная активность в теле и мощность дозы на расстоянии 1 м от пациента при выписке, обеспечивающие непревышение годового предела дозы у окружающих лиц

[Table 3]

Residual activity in the body and dose rate at 1 m from patient during release, which ensure non-exceedance of annual dose limit for people around

Параметр [Parameter]	РФЛП [Radiopharmaceutical]							
	<sup>177</sup> Lu-ПСМА [ <sup>177</sup> Lu-PSMA]		<sup>177</sup> Lu-ДОТА-ТАТЕ [ <sup>177</sup> Lu-DOTATATE]		<sup>131</sup> I-МИБГ [ <sup>131</sup> I-mIBG]		Na <sup>131</sup> I	
	С учётом T <sub>p</sub> , сут	С учётом T <sub>эф</sub> , сут	С учётом T <sub>p</sub> , сут	С учётом T <sub>эф</sub> , сут	С учётом T <sub>p</sub> , сут	С учётом T <sub>эф</sub> , сут	С учётом T <sub>p</sub> , сут	С учётом T <sub>эф</sub> , сут
Взрослые, осуществляющие уход за пациентом [Carers]								
Мощность дозы, мкЗв/ч [Dose rate, μSv/h]	72	190	72	115	60	260	60	65
Активность, ГБк [Activity, GBq]	15	40	15	24	1,2	4,9	1,1	1,3
Население, в том числе дети, контактирующие с пациентом [General public including children in contact with patient]								
Мощность дозы, мкЗв/ч [Dose rate, μSv/h]	29	80	29	46	24	100	24	26
Активность, ГБк [Activity, GBq]	6,1	16	6,1	10	0,5	2,0	0,46	0,51

Наиболее консервативным оказался сценарий облучения для лиц из населения, включая детей, обеспечивающий непревышение дозового предела 1 мЗв от проведения одной терапевтической процедуры в год. Поэтому этот сценарий целесообразно применять для регламентирования критериев выписки пациентов.

Согласно международным рекомендациям, стандартная активность <sup>177</sup>Lu-ПСМА и <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ТАТЕ на одно введение составляет 6,0–7,4 ГБк, а курс лечения может состоять из 4 введений РФЛП с интервалом 4–8 недель [27–29]. Радиологические критерии выписки пациентов после проведения РНТ с <sup>177</sup>Lu, определенные на основании дозиметрической модели без учета биологического выведения <sup>177</sup>Lu в РФЛП, позволяют выписывать пациентов при остаточной активности в теле не выше 6,1 ГБк в случае однократного введения РФЛП за год. Для обеспечения радиационной безопасности окружающих пациента лиц и непревышения годовых пределов доз критерий выписки пациентов должен быть сокращен в число раз, равное числу введений РФЛП за курс РНТ. Радиологические критерии выписки, определенные без учета биологического выведения РФЛП из организма, не позволяют проводить РНТ пациентам в режиме дневного стационара и могут потребовать удержания пациента в отделении РНТ на несколько дней и организации в отделении «активных палат», что, безусловно, снижает доступность РНТ.

Учет биологического выведения РФЛП из организма пациента может существенно смягчить критерии выписки пациентов из отделения РНТ. При планировании курса терапии с 4 введениями РФЛП допускается выписка при мощности дозы 20 мкЗв/ч от пациента на расстоянии 1 м (остаточная активность в теле пациента 4 ГБк) при терапии с <sup>177</sup>Lu-ПСМА и 12 мкЗв/ч (остаточная активность в теле пациента 2,5 ГБк) при терапии с <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ТАТЕ. Учитывая быстрое выведение РФЛП из организма пациента в первые часы после введения (см. табл. 2), можно

предполагать, что большему числу пациентов с нормальной функцией почек возможно проводить РНТ с <sup>177</sup>Lu-ПСМА в условиях дневного стационара. Отдельные пациенты после введения <sup>177</sup>Lu-ПСМА и пациенты при терапии с <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ТАТЕ могут быть задержаны в отделении в «активной палате» на 1–2 сут до снижения контролируемых дозиметрических параметров до допустимых уровней.

Радиологический критерий выписки пациента при РНТ с <sup>131</sup>I, согласно НРБ-99/2009, составляет: 0,4 ГБк и 20 мкЗв/ч на расстоянии 1 м от пациента. Пациенты, проходящие такую терапию, остаются в отделениях РНТ на несколько дней до снижения мощности дозы от них до допустимых уровней. Предлагаемый подход позволит смягчить действующие радиологические критерии выписки для пациентов, проходящих терапию с <sup>131</sup>I-МИБГ в стационарных условиях. При РНТ вводится от 3,7 до 11,2 ГБк <sup>131</sup>I-МИБГ в зависимости от массы тела пациента, при этом курс терапии состоит из нескольких введений [20]. Для препарата <sup>131</sup>I-МИБГ учет биологического выведения радионуклида в РФЛП позволяет смягчить критерий выписки в 4 раза, что позволит раньше выписывать пациента из отделения РНТ, не снижая радиационную безопасность окружающих пациента лиц, и повысит пропускную способность отделений РНТ.

Критерий выписки для пациентов, проходящих РНТ с Na<sup>131</sup>I, скорость биологического выведения которого составляет 80–100 сут, а эффективный период полувыведения – 7,5 сут для взрослых и отличается от периода полураспада (8,02 сут) менее чем на 10%, изменится на 10%.

Согласно документам международных организаций (МКРЗ, МАГАТЭ и др.), решение о выписке пациента рекомендуется принимать в индивидуальном порядке с учётом условий проживания пациента [3, 5, 8, 9, 30, 31]. Для обеспечения радиационной защиты от пациента после РНТ выделяют две группы лиц: лица из населения, с кото-

рыми пациент может случайно взаимодействовать, и члены семьи и близкие люди, которые, осуществляют уход за пациентом. Радиационная защита населения в ситуации планируемого облучения основана на применении концепции граничной дозы [3–7]. Для лиц из категории населения пациент после РНТ может рассматриваться как один из источников техногенного облучения. Доза от данного источника не должна превышать граничной дозы (доли от предела дозы). Для лиц, осуществляющих уход за пациентом, МАГАТЭ и МКРЗ рекомендуют значение граничной дозы, равное 5 мЗв [3,5]. Для лиц из категории населения, с которыми контактирует пациент, при пределе дозы в 1 мЗв за год, граничная доза, как правило, принимается равной 0,3 мЗв [3,5], что ещё больше ужесточает критерии выписки терапевтических пациентов. Однако единый подход к установлению граничных доз пока не принят.

В отечественных нормативных документах понятие граничной дозы, которая устанавливается для контроля и ограничения дозы от отдельного техногенного источника, отсутствует. Вместо этого используется предел дозы для населения – 1 мЗв за год, и ограничение годовой эффективной дозы в 5 мЗв для лиц, ухаживающих за пациентом. При этом оба варианта относятся к полному курсу терапии за год, независимо от числа сеансов – введений РФЛП.

При выписке пациента после РНТ предполагается, что медицинский физик или специалист по радиационной безопасности в отделении РНТ на основании остаточной активности радионуклида в теле пациента, соответствующей мощности дозы и эффективного периода полувыведения, определяет, что доза у лиц из населения не превысит предел дозы, а доза у лиц, осуществляющих уход за пациентом, – граничную дозу [5]. Методика по оценке дозы у окружающих пациента лиц прописана в ряде работ [2, 7, 32]. Дополнительно рекомендуется принимать индивидуальные решения о выписке пациента с учётом следующих факторов: способ перемещения пациента до дома, жилищные условия, возможность

быть изолированным от домочадцев, в частности, от детей и беременных женщин, наличие человека, который будет оказывать помощь и уход в период снижения активности в теле пациента. Лица, осуществляющие уход за пациентом, должны дать письменное информированное согласие и получить инструкции по поведению, минимизирующему дозы облучения от пациента в каждом конкретном случае.

В настоящее время в международной практике нет единого подхода к выписке пациентов после РНТ, так же, как и к установлению граничных доз. Сравнение радиологических критериев выписки пациентов после терапии с РФЛП, мечеными <sup>131</sup>I, в разных странах представлено в таблице 4. Из таблицы 4 видно, что действующие в нашей стране в настоящее время критерии выписки пациентов (НРБ-99/2009) сопоставимы с критериями, применяемыми в странах Европы, Японии и Австралии. Критерии выписки пациентов в США в 3 раза мягче и допускают выписку пациентов при более высоком содержании активности в теле пациента и, соответственно, мощности дозы от него. Радиологические критерии выписки пациентов после радионуклидной терапии с <sup>177</sup>Lu в международных руководствах отсутствуют, однако существующая практика в странах Европы чаще всего требует госпитализации пациентов после радионуклидной терапии с <sup>177</sup>Lu-ПСМА и <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ТАТЕ на 1–2 дня [14], в таких странах, как Австралия, Канада, Турция, допускается лечение в режиме дневного стационара препаратами, мечеными <sup>177</sup>Lu [15, 33].

За счет учета биологического выведения РФЛП из организма пациента предложенный в настоящей работе подход позволит снизить консерватизм действующих радиологических критериев выписки пациентов после РНТ, повысив пропускную способность «активных палат» в отделениях радионуклидной терапии, и повысить доступность терапии, в том числе и за счет проведения процедур в условиях дневного стационара. Однако данный подход требует наличия достоверных данных о биологическом выведении радионуклидов из организ-

Таблица 4

**Сравнение радиологических критериев выписки пациентов после РНТ с <sup>131</sup>I в РФ с практикой других стран**

[Table 4

**Comparison of radiological criteria for discharge of patients after RNT with <sup>131</sup>I in the Russian Federation with the practice of other countries]**

Страна [Country]	Радиологические критерии выписки пациентов [Patient release criteria]	
	Мощность дозы на 1 м от пациента, мкЗв/ч [Dose rate at 1 m from patient, μSv/h]	Активность, ГБк [Activity, GBq]
НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]	20	0,4
РФ [Russia] Настоящая работа Na <sup>131</sup> I [Current study Na <sup>131</sup> I]	26	0,5
Настоящая работа <sup>131</sup> I-МИБГ [Current study <sup>131</sup> I-mIBG]	100	2,0
США, 2019 [7] [USA]	70	1,2
Европа [34] [EU]	–	0,4-0,6
Швеция [Sweden] [34]	–	0,6
Австралия [33] [Australia [34]]	–	0,6
Япония [34] [Japan [34]]	–	0,5

ма пациента, о фармакокинетики РФЛП и определения специфических радиологических критериев для каждого РФЛП или однотипных групп РФЛП. Ограниченные данные о фармакокинетики перспективных РФЛП не позволяют широко использовать этот метод. Для определения биологического выведения из организма пациента можно использовать данные о радиометрии пациента в разные временные точки после введения РФЛП, например:

- данные о радиометрии пациентов с помощью гамма-камеры;
- данные о мощности дозы на расстоянии 1–2 м от пациента в стандартизированной геометрии измерений;
- для тераностических пар можно использовать данные о биовыведении диагностического РФЛП-аналога.

Недостатком предложенного подхода является большой разброс в скоростях выведения РФЛП у пациентов, которое будет зависеть от распространенности патологического процесса, захвата РФЛП в очаге и других индивидуальных особенностей пациента. В случае отсутствия достоверных данных о биовыведении РФЛП из организма пациента целесообразно использовать консервативные радиологические критерии, специфичные для радионуклида, не учитывающие биовыведение радионуклида с РФЛП из организма.

### Заключение

Радиологические критерии выписки пациентов в настоящее время учитывают снижение активности радионуклида в теле пациента и, соответственно, мощности дозы от пациента только за счёт радиоактивного распада метки, что делает их необоснованно консервативными. Учет биологического выведения радионуклида на примере 4 РФЛП позволяет смягчить радиологические критерии, что допускает применение некоторых РФЛП в условиях дневного стационара, а также снижает время нахождения пациентов в стационаре в «активных» палатах без снижения радиационной безопасности населения и окружающих пациента лиц.

Определение специфических для РФЛП критериев выписки с учетом биологического выведения РФЛП из организма пациентов требует достоверных данных о фармакокинетики РФЛП в организме пациентов, при этом для расчёта критериев предлагается использовать среднее значение эффективного периода полувыведения, увеличенное на два среднеквадратичных отклонения, что охватывает 95% случаев из рассматриваемой выборки индивидуальных значений.

Стоит отметить, что предложенный в работе подход основан на использовании наиболее консервативного сценария облучения лиц, контактирующих с пациентом после РНТ, и не учитывает возможности дифференцированного подхода к выписке пациентов, проживающих в разных условиях.

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

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

Звонова И.А.– поиск и анализ литературы, анализ и интерпретация результатов, редактирование текста статьи.

Водоватов А.В.– разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Петрякова А.В.– поиск и анализ литературы, проведение расчетов, описание материалов и методов, перевод.

Станжевский А.А.– поиск и анализ литературы, описание текущего состояния ядерной медицины в стране и проблематики.

Важенина Д.А.– анализ результатов.

Смолярчук М.Я.– анализ результатов.

Рыжов С.А.– анализ результатов.

### Благодарности

Авторы выражают свою благодарность отечественным специалистам ядерной медицины, принимавшим участие в обсуждении данной проблемы на многочисленных круглых столах и конференциях.

### 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. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А. Радиологические критерии выписки пациента из клиники после радионуклидной терапии или брахитерапии с имплантацией закрытых источников // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, №4. С. 5–9.
2. Zvonova I., Balonov M., Golikov V. Release criteria for patients having undergone radionuclide therapy and criteria for their crossing the state border of the Russian Federation // Radiation Protection Dosimetry. 2011. Vol. 147, № 1-2. P. 254–257. doi: 10.1093/rpd/ncr308.
3. International Atomic Energy Agency, Release of Patients After Radionuclide Therapy, Safety Reports Series No. 63, IAEA, Vienna (2009).
4. International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. Interim edition. Safety Standards Series No. GSR Part 3 (interim). IAEA, Vienna (2011).
5. International Commission on Radiological Protection. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication 94. Ann ICRP/ 2004. 34(2).
6. European Commission. Radiation protection following 131I-therapy. Exposures due to out-patients or discharged in-patients. Radiation Protection 97. Directorate General for Environment Nuclear Safety and Civil Protection, Brussels (1998).
7. U.S. Nuclear regulatory commission. Draft regulatory guide DG-8057. "Release of patients administered radioactive material", Washington, DC, 2019.
8. Наркевич Б.Я., Лысак Ю.В. Обеспечение радиационной безопасности при амбулаторном режиме применения терапевтических радиофармпрепаратов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. Т. 60, № 4. С. 27–35.
9. Воронцова М.С., Кармакова Т.А., Панкратов А.А., и др. Современные тенденции развития таргетной радионуклидной терапии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66, № 6. С. 63–70. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-6-63-70>.
10. Чернов В.И., Брагина О.Д., Синилкин И.Г., и др. Радиоиммунотерапия в лечении злокачествен-

- ных образований // Сибирский онкологический журнал. 2016. Т. 15, № 2. С. 101-106. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2016-15-2-101-106>.
11. International Commission on Radiological Protection. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP. 2008. 38 (3).
  12. Kurth J., Krause B.J., Schwarzenböck S.M., et al. External radiation exposure, excretion, and effective half-life in <sup>177</sup>LuPSMA-targeted therapies // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging research. 2018. Vol. 8, №. 1. P. 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13550-018-0386-4>.
  13. Demir M., Abuqbeith M., Uslu-Beşli L., et al. Evaluation of radiation safety in <sup>177</sup>Lu-PSMA therapy and development of outpatient treatment protocol // Journal of Radiological Protection. 2016. Vol. 36, No. 2. P. 269–278. doi:10.1088/0952-4746/36/2/269.
  14. Schuchardt C., Zhang J., Kulkarni H.R., et al. Prostate-Specific Membrane Antigen Radioligand Therapy Using <sup>177</sup>Lu-PSMA I&T and <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 in Patients with Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer: Comparison of Safety, Biodistribution, and Dosimetry // Journal of Nuclear Medicine. 2022. Vol. 63, P. 1199–1207. DOI: 0.2967/jnumed.121.262713.
  15. Крылов В.В., Легкодимова Н.С., Кочетова Т.Ю., и др. Радиолигандная терапия <sup>177</sup>Lu-ДОТА-ПСМА при метастатическом кастрационно-резистентном раке предстательной железы. Фармакокинетика, безопасность, противоопухолевая эффективность // Лучевая диагностика и терапия. 2022. Т. 13, № 4. С. 75–85, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-4-75-85>.
  16. Wehrmann C., Senftleben S., Zachert C., et al. Results of individual patient dosimetry in peptide receptor radionuclide therapy with <sup>177</sup>Lu DOTA-TATE and <sup>177</sup>Lu DOTA-NOC // Cancer Biother Radiopharm. 2007. Vol. 22, № 3. P. 406–16.
  17. Levart, D., Kalogianni, E., Corcoran, B. et al. Radiation precautions for inpatient and outpatient <sup>177</sup>Lu-DOTATATE peptide receptor radionuclide therapy of neuroendocrine tumours // EJNMMI Physics. 2019. Vol. 6, P. 7. <https://doi.org/10.1186/s40658-019-0243-1>.
  18. Jacobsson L., Mattsson S., Johansson L., et al. Biokinetics and dosimetry of <sup>31</sup>I-metaiodobenzylguanidine (MIBG) // Proc. Fourth Int. Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium. Oak Ridge 1985, Oak Ridge Assoc. Universities CONF-851113, Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge, Tennessee. 1986. P. 389-398.
  19. International Commission on Radiological Protection. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. Annals of the ICRP. 1988. 18 (1-4).
  20. Gear J., Chiesa C., Lassmann M., et al. EANM Dosimetry Committee. EANM Dosimetry Committee series on standard operational procedures for internal dosimetry for <sup>131</sup>I mIBG treatment of neuroendocrine tumours // EJNMMI Physics. 2020. Vol. 7, No. 1. P. 15. doi: 10.1186/s40658-020-0282-7.
  21. Звонова И.А., Лихтарев И.А., Николаева А.А. Облучение щитовидной железы, сопровождающее радиойодное обследование пациентов с тиреоидными заболеваниями // Медицинская радиология. 1982. Т. 4, С. 42-44.
  22. Трухин А.А. Методы и средства повышения эффективности лечебно-диагностических процессов в аппаратно-программном комплексе радиойодтерапии тиреотоксикоза человека: автореф. дисс. на соискание степени канд. техн. наук. Москва, 2022. 19 с.
  23. IAEA-TECDOC-1608. Nuclear Medicine In Thyroid Cancer Management: A Practical Approach IAEA, Vienna, 2009, 141 p.
  24. Радионуклидная диагностика для практических врачей / Под ред. Ю.Б. Лишманова, В.И. Чернова. Томск: STT, 2004. С.317-319.
  25. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Звонова И.А., и др. Обращение с биологическими отходами пациентов после проведения радионуклидной терапии // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 19-30. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30.
  26. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Петрякова А.В., и др. Обоснование дифференцированного подхода к обращению с биологическими отходами пациентов в подразделениях ядерной медицины // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 34-44. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-34-44>.
  27. Gleisner K.S., Chouin N., Gabina P.M., et al. EANM dosimetry committee recommendations for dosimetry of <sup>177</sup>Lu-labelled somatostatin-receptor- and PSMA-targeting ligands // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2022. Vol. 49, No. 6. P. 1778-1809. doi: 10.1007/s00259-022-05727-7.
  28. Станжевский А.А., Майстренко Д.Н., Важенина Д.А., и др. Методы дозиметрического планирования в радионуклидной терапии. Часть 2: уровни планирования // Лучевая диагностика и терапия. 2022. Т. 13, № 4. С. 16-26. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26>.
  29. Sgouros G., Bolch WE, Chiti A., et al. ICRU REPORT 96, Dosimetry-Guided Radiopharmaceutical Therapy // Journal of the ICRU. 2021. Vol. 21, No. 1. P. 1–212. doi: 10.1177/14736691211060117.
  30. International Atomic Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization, Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.5, IAEA, Vienna (2002).
  31. International Atomic Energy Agency. Nuclear Medicine Resources Manual 2020 Edition, IAEA Human Health Series No. 37, IAEA, Vienna (2020).
  32. Saha GB. Radiation Safety in Nuclear Medicine. A Practical, Concise Guide. Springer Nature Switzerland AG, 2019, 192 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16406-5>.
  33. Turner J.H. Outpatient therapeutic nuclear oncology. Annals of Nuclear Medicine. 2012. No 26. P. 289–97.
  34. Mattsson S., Hoeschen C. Radiation Protection in Nuclear Medicine. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 159 p.

Поступила: 27.04.2023 г.

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

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9153-3061>

**Звонова Ирина Александровна** – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной

гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4340-8666>

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

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

**Петрякова Анастасия Валерьевна** – и.о. младшего научного сотрудника лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; инженер по радиационной безопасности СПб ГБУЗ «Городская больница № 40», Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2663-9091>

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

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1630-0564>

**Важенина Дарья Андреевна** – доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории тераностики онкологических заболеваний Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, доцент ВАК, Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6236-709X>

**Смолярчук Максим Ярославович** – врач-радиолог, заместитель главного врача по КЭР ООО «Медицина и ядерные технологии», президент МОО «Общество ядерной медицины», Москва, Россия

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9819-8657>

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

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0640-7368>

**Для цитирования:** Чипига Л.А., Звонова И.А., Водоватов А.В., Петрякова А.В., Станжевский А.А., Важенина Д.А., Смолярчук М.Я., Рыжов С.А. Совершенствование подхода к определению радиологических критериев выписки пациентов после радионуклидной терапии // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 19-31. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-19-31

## Improvement of the approach to definition of patient release criteria after radionuclide therapy

Larisa A. Chipiga<sup>1,2,3</sup>, Irina A. Zvonova<sup>1</sup>, Aleksandr V. Vodovatov<sup>1,4</sup>, Anastasia V. Petryakova<sup>1,5</sup>, Andrey A. Stanzhevsky<sup>2</sup>, Daria A. Vazhenina<sup>2</sup>, Maksim Ya. Smoliarchuk<sup>6,7</sup>, Sergey A. Ryzhov<sup>8,9,10</sup>

<sup>1</sup> 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

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

<sup>3</sup> Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

<sup>4</sup> Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>5</sup> The City Hospital No 40 of the Kurortny District, Saint-Petersburg, Russia

<sup>6</sup> "Medicine and Nuclear Technologies" LLC, Moscow, Russia

<sup>7</sup> Association of Nuclear Medicine, Moscow, Russia

<sup>8</sup> Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

<sup>9</sup> Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

<sup>10</sup> Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

*Current patient release criteria established in NRB-99/2009 relate to four radionuclides used in Russia that period of the document preparation. These criteria were calculated only considering the radionuclide decay. Thus, these criteria give conservative assessments which require the patient to stay in dedicated protected room ("hot" room) of the radiotherapy department for several days and do not allow to radionuclide therapy to be given in the outpatient hospital which certainly reduces the availability of this type of treatment. Consideration of the biological excretion of the radiopharmaceutical will be able to make the patient release criteria after radionuclide therapy significantly softer. Recently, new promising radionuclides and radiopharmaceuticals for therapy have appeared, the introduction of which into medical practice is obstructed by the lack of the patient release criteria. Current study is devoted to justification of improvement the approach to definition of patient release criteria after radionuclide therapy with promising and applied radiopharmaceuticals considering biological excretion of radiopharmaceutical. As examples, calculations of patient release criteria were performed for <sup>177</sup>Lu-PSMA, <sup>177</sup>Lu-DOTA-TATE, <sup>131</sup>I-mIBG u Na<sup>131</sup>I. The dosimetric model used for calculation is based on the model which was used for definition of the current patient release criteria in NRB-99/2009. Additionally, the biological excretion of the radionuclide in radiopharmaceutical, which was assessed according to the published data, was considered. Two phases of biological excretion were evaluated for considered radiopharmaceuticals (fast and slow fractions). The main contribution of the radionuclide decrease in the patient's body during the first hours after the injection is made by the fast-eliminated fraction. During 4-6 hours after the administration about 50% of these radiopharmaceuticals eliminated via urine. The calculation of patient release criteria were performed for slow-elimination fractions which characterize the decrease of radionuclide activity in the body after the patient release. The following effective half-lives were used: <sup>177</sup>Lu-PSMA – 60 hours, <sup>177</sup>Lu-DOTA-TATE – 100 hours, <sup>131</sup>I-mIBG – 45 hours, Na<sup>131</sup>I – 7.5 days. The calculations demonstrate when planning a course of radionuclide therapy with four administrations of <sup>177</sup>Lu-PSMA, the release of a patient is allowed at the dose rate of 20 μSv/h from the patient at the distance of 1 m; in case of radionuclide therapy with <sup>177</sup>Lu-DOTA-TATE, release of a patient is allowed at the dose rate of 12 μSv/h. Considering the fast-eliminated fraction in the first hours after the administration, it can be assumed that more patients with normal renal function can undergo radionuclide therapy with <sup>177</sup>Lu-PSMA in the outpatient hospital. Some patients after the <sup>177</sup>Lu-PSMA administration and patients in the therapy with <sup>177</sup>Lu-DOTA-TATE may be held in the department in the "hot" rooms for 1-2 days until the dose rate decrease to the acceptable levels. The consideration of biological excretion of radiopharmaceutical makes it possible to soften patient release criterion for <sup>131</sup>I-mIBG by four times and for Na<sup>131</sup>I – by 10%. It will allow to release patients after radionuclide therapy earlier without reduce of radiation safety of people around the patient and will increase the capacity of radionuclide therapy department.*

**Key words:** nuclear medicine, radionuclide therapy, radiopharmaceutical, patient release criteria, radiation safety, effective half-life.

**Larisa A. Chipiga**

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

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

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

Chipiga L.A.– 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.

Zvonova I.A.– search and analysis of literature, analysis and interpretation of the results, editing the text of the article.

Vodovатов A.V.– development of the study design, analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Petryakova A.V.– search and analysis of literature, calculations, description of materials and methods, translation.

Stanzhevsky A.A.– search and analysis of literature, description of current state of nuclear medicine in Russia and issue for the study.

Vazhenina D.A.– analysis of the results.

Smoliarchuk M.Ya.– analysis of the results.

Ryzhov S.A.– analysis of the results.

### Acknowledgements

The authors express their gratitude to the domestic specialists in nuclear medicine who hosted the discussion of this problem at numerous round tables and conferences.

### Information about the conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to disclose.

### Information about the source 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

- Balonov MI, Golikov Vy, Zvonova IA. Radiological Criteria for Patient Release from Clinic after Radionuclide Therapy of Brachytherapy with Sealed Source Implantation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 5-9. (In Russian).
- Zvonova I, Balonov M, Golikov V. Release criteria for patients having undergone radionuclide therapy and criteria for their crossing the state border of the Russian Federation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011;147(1-2): 254-257. doi: 10.1093/rpd/ncr308.
- International Atomic Energy Agency, Release of Patients After Radionuclide Therapy, Safety Reports Series No. 63, IAEA, Vienna; 2009.
- International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. Interim edition. Safety Standards Series No. GSR Part 3 (interim). IAEA, Vienna; 2011.
- International Commission on Radiological Protection. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication 94. *Annals of the ICRP*. 2004. 34(2).
- European Commission. Radiation protection following 131I-therapy. Exposures due to out-patients or discharged in-patients. Radiation Protection 97. Directorate General for Environment Nuclear Safety and Civil Protection, Brussels; 1998.
- U.S. Nuclear regulatory commission. Draft regulatory guide DG-8057. "Release of patients administered radioactive material", Washington, DC; 2019.
- Narkevich BYa, Lysak YuV. Radiation Safety in the Outpatient Regimen for the Use of Therapeutic Radiopharmaceuticals. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2015;60(4): 27-35. (In Russian).
- Vorontsova MS, Karmakova TA, Pankratov AA, Kaprin AD. Current Trends in Targeted Radionuclide Therapy Development. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;6: 63-70. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-6-63-70>.
- Chernov VI, Bragina OD, Siniilkin IG, Titskaya AA, Zelchan RV. Radioimmunotherapy in the Treatment of Malignancies. *Siberian journal of oncology*. 2016;15(2): 101-106. (In Russian) <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2016-15-2-101-106>.
- International Commission on Radiological Protection. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. *Annals of the ICRP*. 2008; 38 (3).
- Kurth J, Krause BJ, Schwarzenböck SM, et al. External radiation exposure, excretion, and effective half-life in <sup>177</sup>LuPSMA-targeted therapies. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging research*. 2018;8(1): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13550-018-0386-4>.
- Demir M, Abuqbeith M, Uslu-Beşli L, Yıldırım, Ö, Yeyin N, et al. Evaluation of radiation safety in <sup>177</sup>Lu-PSMA therapy and development of outpatient treatment protocol. *Journal of Radiological Protection*. 2016;36(2): 269–278. doi:10.1088/0952-4746/36/2/269.
- Schuchardt C, Zhang J, Kulkarni HR, Chen X, Müller D, Baum RP. Prostate-Specific Membrane Antigen Radioligand Therapy Using <sup>177</sup>Lu-PSMA I&T and <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 in Patients with Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer: Comparison of Safety, Biodistribution, and Dosimetry. *Journal of Nuclear Medicine*. 2022; 63:1199–1207. DOI: 0.2967/jnumed.121.262713.
- Krylov VV, Legkodimova NS, Kochetova TYu, Petriev VM, Sigov MA, Tishchenko VK, et al. Radioligand therapy with <sup>177</sup>Lu-DOTA-PSMA in metastatic castration-resistant prostate cancer. Pharmacokinetics, safety, antitumour efficacy. *Luchevaya diagnostika i terapiya = Diagnostic Radiology and Radiotherapy*. 2022;13(4): 75-85. (In Russian) <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-4-75-85>.
- Wehrmann C, Senfleben S, Zachert C, Müller D, Baum RP. Results of individual patient dosimetry in peptide receptor radionuclide therapy with <sup>177</sup>Lu DOTA-TATE and <sup>177</sup>Lu DOTA-NOC. *Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals*. 2007;22(3): 406–16.
- Levar D, Kalogianni E, Corcoran B, et al. Radiation precautions for inpatient and outpatient <sup>177</sup>Lu-DOTATATE peptide receptor radionuclide therapy of neuroendocrine tumours. *EJNMMI Physics*. 2019;6: 7. <https://doi.org/10.1186/s40658-019-0243-1>.
- Jacobsson L, Mattsson S, Johansson L, Lindberg S, Fjglling M. Biokinetics and dosimetry of <sup>131</sup>I-metaiodobenzylguanidine (MIBG). Proc. Fourth Int. Rndiopharmaceutical Dosimetry Symposium. Oak Ridge 1985, Oak Ridge Assoc. Universities CONF-851113, Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge, Tennessee. 1986. P. 389-398.
- International Commission on Radiological Protection. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. *Annals of the ICRP*. 1988;18 (1-4).
- Gear J, Chiesa C, Lassmann M, et al. EANM Dosimetry Committee. EANM Dosimetry Committee series on standard operational procedures for internal dosimetry for <sup>131</sup>I MIBG treatment of neuroendocrine tumours. *EJNMMI Physics*. 2020;7(1): 15. doi: 10.1186/s40658-020-0282-7.
- Zvonova IA, Likhtarev IA, Nikolaeva AA. Thyroid irradiation accompanying radioiodine examination of patients with thyroid diseases. *Meditsinskaya radiologiya = Medical Radiology*. 1982; 4: 42-44 (In Russian).
- Trukhin A.A. Methods and tools for improving of diagnostic and treatment efficiency in the hardware complex of thyrotoxicosis radioiodine therapy [abstract of PhD thesis]. Moscow; 2022.

23. IAEA-TECDOC-1608. Nuclear Medicine in Thyroid Cancer Management: A Practical Approach IAEA, Vienna; 2009, P.141.
24. Radionuclide diagnostics for practitioners. Ed. Yu.B. Lishmanova, V.I. Chernov. Tomsk: STT; 2004. P. 317-319. (In Russian).
25. Chipiga LA, Vodovatov AV, Zvonova IA, Stanzhevsky AA, Petryakova AV, Anokina EE, et al. Management of biological waste of patients after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(2): 19-30. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30>.
26. Chipiga LA, Vodovatov AV, Petryakova AV, Zvonova IA, Stanzhevsky AA, Maistrenko DN, et al. Justification of differential approach to management of patient biological waste in nuclear medicine departments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4):34-44. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-34-44>.
27. Gleisner KS, Chouin N, Gabina PM, Cicone F, Gnesin S, et al. EANM dosimetry committee recommendations for dosimetry of <sup>177</sup>Lu-labelled somatostatin-receptor- and PSMA-targeting ligands. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2022;49(6): 1778-1809. doi: 10.1007/s00259-022-05727-7.
28. Stanzhevsky AA, Maistrenko DN, Vazhenina DA, Sysoev DS, Vodovatov AV, Chipiga LA, et al. Methods of dosimetry-based treatment planning in radiopharmaceutical therapy. Part 2: Planning levels. *Luchevaya diagnostika i terapiya = Diagnostic Radiology and Radiotherapy*. 2022;13(4): 16-26. (In Russian) <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26>.
29. Sgouros G, Bolch WE, Chiti A, et al. ICRU REPORT 96, Dosimetry-Guided Radiopharmaceutical Therapy. *Journal of the ICRU*. 2021; 21(1):1-212. doi: 10.1177/14736691211060117.
30. International Atomic Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization, Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.5, IAEA, Vienna; 2002.
31. International Atomic Energy Agency. Nuclear Medicine Resources Manual 2020 Edition, IAEA Human Health Series No. 37, IAEA, Vienna; 2020.
32. Gopal B. Saha. Radiation Safety in Nuclear Medicine. A Practical, Concise Guide. Springer Nature Switzerland AG, 2019; 192 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16406-5>.
33. Turner JH. Outpatient therapeutic nuclear oncology. *Annals of Nuclear Medicine*. 2012; 26: 289-97.
34. Mattsson S, Hoeschen C. Radiation Protection in Nuclear Medicine. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013; 159 p.

Received: April 27, 2023

**For correspondence: 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 Well-Being; research fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com)

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9153-3061>

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

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4340-8666>

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

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

**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 Well-Being; radiation safety engineer, Saint-Petersburg City Hospital No. 40, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2663-9091>

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

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1630-0564>

**Daria A. Vazhenina** – M.D., Chief Researcher, Head of Laboratory of Theragnostic and Oncology, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6236-709X>

**Maksim Ya. Smoliarchuk** – Radiologist, Deputy Director of Clinical and Expert Work of “Medicine and Nuclear Technologies” LLC, President of Association of Nuclear Medicine, Moscow, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9819-8657>

**Sergey A. Ryzhov** – vice president, Association of Medical Physicists in Russia; 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; research fellow, Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies; Moscow, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0640-7368>

**For citation: Chipiga L.A., Zvonova I.A., Vodovatov A.V., Petryakova A.V., Stanzhevsky A.A., Vazhenina D.A., Smoliarchuk M.Ya., Ryzhov S.A. Improvement of the approach to definition of patient release criteria after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 19-31. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-19-31**

## Неопределенность оценки доз в костном мозге от $^{89,90}\text{Sr}$ из-за изменчивости химического состава и плотности кости

Е.А. Шишкина<sup>1,2</sup>, П.А. Шарагин<sup>1</sup>, Е.И. Толстых<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Для расчета доз внутреннего облучения красного костного мозга применяется моделирование переноса излучений в тканях костей скелета с использованием вычислительных фантомов. Вычислительные фантомы МКРЗ созданы для стандартного человека с анатомическими характеристиками, типичными для среднестатистического индивидуума. Дозы, рассчитываемые на основе таких фантомов, будут соответствовать неким среднепопуляционным, а индивидуальная изменчивость будет вносить стохастическую компоненту неопределенности в оценку доз. Целью настоящей работы является оценка влияния вариабельности химического состава и плотности кости на результаты дозиметрического моделирования. Использовали вычислительные фантомы фрагментов костей скелета, которые представлены простыми геометрическими фигурами, заполненными трабекулярными структурами и костным мозгом и покрытыми снаружи кортикальным слоем. Перенос излучений имитировался методом Монте-Карло. Рассчитывались коэффициенты перехода от удельной активности радионуклидов к мощности поглощенной дозы в красном костном мозге при их равномерном распределении в объеме трабекулярной либо кортикальной кости. На основе расчетов получены коэффициенты, позволяющие конвертировать удельную активность радионуклида в единицы мощности поглощенной дозы в красном костном мозге. В результате численных экспериментов было показано, что вариации химического состава в пределах физиологических показателей не вносят дополнительной погрешности больше  $\pm 4\%$  в значение доз на красный костный мозг. Влияние плотности костной ткани на формирование дозы в красном костном мозге зависит от размера фантома. Для фантомов, чьи линейные размеры превышают две длины свободного пробега электронов ( $\sim 0,44$  см), вариабельность плотности костной ткани в пределах  $\pm 3\%$  приводит к аналогичной по величине относительной неопределенности коэффициентов перехода. Однако для фантомов меньших размеров вариабельность плотности костной ткани приводит к неопределенностям этих коэффициентов равным 6% или 13%, если источник депонирован в трабекулярной или кортикальной кости соответственно. Полученные результаты будут использованы при оценке суммарной неопределенности поглощенных доз красным костным мозгом с учетом неопределенности всех используемых параметров, включая вариабельность морфометрических характеристик костей, вариабельности распределения красного костного мозга между структурами скелета, а также неопределенность, привносимую модельными приближениями.

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

### Введение

Красный костный мозг (ККМ) является одной из наиболее радиочувствительных тканей тела человека. Радиационное воздействие на ККМ увеличивает риск лейкозов и других гематологических и иммунных заболеваний [1–5]. Дозиметрия ККМ чрезвычайно важна для изучения эффектов ионизирующего излучения.

Коэффициент перехода ( $DF$ ) от удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  или  $^{89}\text{Sr}$  в объеме трабекулярной ( $TBV$ ) или кортикальной ( $CBV$ ) кости к мощности поглощенной дозы в ККМ ( $DF(AM \leftarrow TBV)$  или  $DF(AM \leftarrow CBV)$  соответственно) рассчитывается согласно уравнению (1):

$$DF(AM \leftarrow s) = \bar{\epsilon}(BM \leftarrow s) \frac{m_s}{m_{BM}}, \quad (1)$$

где  $\bar{\epsilon}(BM \leftarrow s)$  – поглощенная энергия в ткани-мишени при единичном распаде изотопа,  $AM$  – красный костный мозг,  $BM$  – костный мозг;  $s$  – ткань-источник ( $CBV$  или  $TBV$ ).

Для расчета поглощенной энергии использован метод Монте-Карло и вычислительные фантомы, представляющие собой трехмерную модель участков костей (сегментов). Следует отметить, что фантомы МКРЗ [6] созданы для стандартного человека с анатомическими и физиологическими характеристиками.

**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

логическими характеристиками, типичными для средне-статистического индивидуума. Дозы, рассчитываемые на основе таких фантомов, будут соответствовать неким средним популяционным. При этом индивидуальная вариабельность параметров, включая химический состав и плотность), будет вносить стохастическую компоненту неопределенности в оценку доз.

Химический состав костной ткани хорошо изучен. В ней содержится около 12% воды, примерно 30% основного вещества образовано органическими соединениями, а остальное — неорганические компоненты [7, 8]. Массовая доля кальция в среднем составляет ~20% от сырого веса кости и может варьировать от 20% до 40% [9–11]. В составе костной ткани практически нет тяжелых металлов (атомная масса >50; зарядовое число ≥25). Присутствие тяжелых металлов увеличивает плотность электронов вещества, которая, в свою очередь, существенно влияет на ионизационные потери. Однако в кости обнаруживаются лишь следовые количества Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Ba и Pb [12]. Общая их массовая доля <0,037%. Таким образом, нет оснований ожидать существенного влияния вариаций химического состава костной ткани на процесс формирования дозы в костном мозге, однако это утверждение требует проверки и количественной оценки.

Большинство авторов, исследовавших плотность костной ткани, указывают на небольшую индивидуальную вариабельность этого параметра – от 1,5 до 3% [13–15]. Ее влияние на  $DF$  определяется, с одной стороны, увеличением плотности костной ткани, что приводит к уменьшению среднего пробега электронов,  $\lambda_e(\bar{E})$  в ней (в приближении непрерывного замедления). Это ведет к уменьшению поглощенной энергии в ККМ. С другой стороны, изменяется соотношение масс ткани-источника и ткани-мишени, что ведет к увеличению  $DF$  (согласно уравнению 1). Кроме того, имеют значение линейные размеры фантомов. Как было показано в [16], при распаде  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  и  $^{89}\text{Sr}$ , 95% излучаемой энергии поглощается на радиальном расстоянии  $2\lambda_e(\bar{E})\approx 0,44$  см от точечного источника. То есть влияние плотности на  $DF$  будет различным для условно «больших» фантомов (все линейные размеры  $>2\lambda_e(\bar{E})$ ) и «малых». А для источника, инкорпорированного в кортикальную кость, значение должна иметь толщина кортикального слоя.

В настоящее время не существует описания общих закономерностей влияния плотности костной ткани на  $DF(AM\leftarrow TBV)$  и  $DF(AM\leftarrow CBV)$  при распаде инкорпорированных в ней  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  и  $^{89}\text{Sr}$ . Более того, для условно «малых» сегментов вряд ли возможно подобное аналитическое описание, так как на формирование дозы начнет влиять и форма кости. Однако для «больших» моделей (где форма и размеры модели не играют существенной роли), можно описать общие закономерности, что поможет оценить неопределенность  $DF$ , связанную с вариабельностью плотности костной ткани.

**Цель исследования** – оценка влияния вариабельности физико-химических параметров модели, а именно химического состава и плотности кости на результаты оценок поглощенных доз в ККМ.

Для этого были выполнены численные эксперименты при разных химических составах, характерных для кальцифицированных тканей человека, а именно костной ткани

и дентина зубов. Были изучены общие закономерности влияния плотности костной ткани на результаты дозиметрического моделирования для «больших» фантомов и оценен их вклад в неопределенность доз на ККМ. Для малых фантомов оценивалась неопределенность сопоставлением расчетов, проведенных для двух вариантов плотности кости:  $1,65\text{ г см}^{-3}$  и  $1,9\text{ г см}^{-3}$ , характерных для новорожденного и человека 20 лет соответственно [17, 18].

### Материалы и методы

Вычислительные фантомы строились на основе следующих параметров: линейные размеры, толщина кортикального слоя ( $Ct.Th$ ), средняя толщина трабекул ( $Tb.Th$ ), среднее межтрабекулярное расстояние ( $Tb.Sp$ ), средняя доля костной ткани ( $BV/TV$ ) [19–21], элементный состав и плотность кости и костного мозга. В качестве линейных размеров костных сегментов использовались: 1) для прямоугольного параллелепипеда – длина, ширина и высота ( $a\times b\times c$ ); 2) для эллипсоида – оси ( $l\times m\times n$ ); 3) для цилиндра – оси эллиптического основания и высота ( $l\times m\times H$ ); 4) для деформированного цилиндра – оси верхнего и нижнего эллиптических оснований и высота ( $l_1\times m_1\times l_2\times m_2\times H$ ). Размеры и параметры микроархитектуры выбирались так, чтобы соответствовать реалистичным значениям, которые с высокой долей вероятности встречаются у людей [20–22]. Воксельное разрешение принималось равным  $0,7\times Tb.Th$ . Фантомы генерировались с использованием оригинальной программы «Trabecula» [23].

Перенос электронов и фотонов моделировали с помощью MCNP6.2 [24]. Хотя есть данные, что гематопэтические стволовые клетки обнаруживаются преимущественно вблизи поверхностей костных трабекул [25, 26], современная концепция радиологической защиты [27] предполагает, что они распределены равномерно в объеме костномозговых полостей с активным кровотоком. В этом приближении удельная поглощенная энергия в костном мозге будет равна таковой в ККМ (уравнение 1), и оно реалистично для электронов радиоактивного распада как  $^{89}\text{Sr}$  ( $\bar{E}=0,585\text{ МэВ}$ ,  $Q$  (энергия, выделяющаяся при распаде)= $1,495\text{ МэВ}$ ), так и  $^{90}\text{Sr}$  в равновесии с дочерним  $^{90}\text{Y}$  ( $\bar{E}=0,565\text{ МэВ}$ ,  $Q=2,28\text{ МэВ}$ ). Спектры излучения  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$  взяты из информационной системы JANIS 4.1 [28]. Распады  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$  моделируются с равной вероятностью. Полученные результаты преобразовали в мощность поглощенной дозы в ККМ от единичного распада  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{89}\text{Sr}$  отдельно для источника, распределенного в TBV и CBV ( $DF(AM\leftarrow TBV)$  и ( $DF(AM\leftarrow CBV)$ ) согласно уравнению (1). Коэффициенты перехода ( $DF(AM\leftarrow TBV)$  и ( $DF(AM\leftarrow CBV)$  выражены в единицах (Гр/с) на (Бк/г). Поглощение энергии рассчитывалось на распад материнского радионуклида. Количество историй исходных частиц составило не менее 4 000 000; статистическая погрешность <1%.

### Изучение влияния химического состава

Принималось, что химический состав влажной (живой) минерализованной кости одинаков для кортикальной и трабекулярной костей. Было выбрано два варианта химического состава: основной и альтернативный (табл. 1). Основной – химический состав костной ткани и костного мозга, принятый в Публикации 89 МКРЗ [17]. В качестве альтернативного взят химический состав дентина зубов [29] и воды.

Таблица 1

Основной и альтернативный химические составы тканей кости (массовые доли), а также состав спонгиозы в приближении гомогенной среды

[Table 1

Basic and alternative chemical composition of bone tissues (mass fractions) as well as the spongiosa composition in the approximation of homogenous medium]

Элемент [Element]	Основной [Basic]		Альтернативный [Alternative]		Гомогенная спонгиоза [Homogenous spongiosa]
	Кость [Bone]	Костный мозг [Bone marrow]	Кость [Bone]	Костный мозг [Bone marrow]	
H	0,035	0,105	0,012	0,11	0,102
C	0,16	0,414	0,028	–	0,400
N	0,042	0,034	–	–	0,033
O	0,445	0,439	0,44	0,89	0,425
F	–	–	0,0096	–	0,001
Na	0,003	0,001	0,007	–	0,002
Mg	0,002	0,002	0,011	–	0,002
Si	–	–	0,00001	–	0,425
P	0,095	0,002	0,16	–	0,001
S	0,003	0,002	–	–	0,002
Cl	–	–	0,0074	–	–
K	–	–	0,0007	–	–
Ca	0,215	–	0,331	–	0,033
Fe	–	–	0,0001	–	0,001
Zn	–	–	0,0002	–	–

Вычислительные фантомы имели форму прямоугольных параллелепипедов с линейными размерами 1,1×0,6×3 см. Толщина кортикального слоя  $Ct.Th = 0,08$  см, а микроархитектура спонгиозы описывалась параметрами:  $Tb.Th = 90$  мкм,  $Tb.Sp = 900$  мкм и  $BV/TV = 0,09$ . Плотность костной ткани – 1,9 г/см<sup>3</sup>; плотность костного мозга – 0,98 г/см<sup>3</sup>.

*Изучение влияния плотности кости*

Фантомы условно были разделены на те, у которых линейные размеры спонгиозы превышают  $2\lambda_e(\bar{E})$  спектра излучений <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y и <sup>89</sup>Sr, и те, что меньше этой величины. Для первых (условно назовем их «большими») величина  $DF(AM←TBV)$  не чувствительна к вариации формы и размеров [16]. Величина  $DF(AM←CBV)$  будет, помимо плотности кости, зависеть от  $Ct.Th$ . Поэтому при изучении влияния плотности на  $DF(AM←CBV)$  была изучена зависимость этого коэффициента от 2 параметров. Для «малых» моделей, форма и размеры будут влиять на  $DF(AM←TBV)$  и  $DF(AM←CBV)$ . То есть дизайн исследований для «больших» и «малых» фантомов отличался.

*«Большие» фантомы*

Влияние плотности на  $DF(AM←TBV)$  больших моделей оценено из теоретических соображений в предположении пренебрежимо малых различий в поглощении энергии трабекулами. Это предположение было проверено сопоставлением теоретических оценок с результатами имитационного моделирования. Параметры фантомов,

использованных для сравнения, приведены в таблице 2 (модели 1–12). Каждая из моделей основана на реалистичных параметрах костей людей разных возрастов [20–22]. Использован основной химический состав (см. табл. 1).

Для оценки эффекта плотности на  $DF(AM←CBV)$  учитывалось поглощение энергии в кортикальном слое. Была создана «большая» модель спонгиозы в виде цилиндра с радиусом оснований  $R = 1$  см и высотой  $H = 2,6$  см. Боковая поверхность цилиндра покрывалась кортикальными слоями разной толщины ( $Ct.Th$ : 0,01 см; 0,02 см; 0,04 см; 0,06 см; 0,08 см; 0,1 см; 0,2 см; 0,3 см; 0,4 см; 0,5 см). Для каждой из моделей плотность костной ткани принимала 4 варианта значений: 1,65 г см<sup>-3</sup>; 1,75 г см<sup>-3</sup>; 1,8 г см<sup>-3</sup> и 1,9 г см<sup>-3</sup>. Спонгиоза представляла собой гомогенную среду, химический состав которой представлен в таблице 1. Гомогенность является приемлемым приближением, так как: 1)  $CBV$  является внешним источником по отношению к спонгиозе; 2) рассчитывалось отношение энергии, поглощенной в спонгиозе при заданной плотности кости ( $\bar{E}_p$ ) к таковой, рассчитанной для плотности 1,9 г см<sup>-3</sup> ( $\bar{E}_{1,9}$ ) при прочих равных условиях ( $\bar{E}_p/\bar{E}_{1,9}$ ). Плотность гомогенной спонгиозы изменялась в диапазоне 1,08–1,46 г см<sup>-3</sup>, что соответствовало вариации доли костной ткани в диапазоне от 0,12 до 0,51. Всего выполнено 120 вариантов расчетов для различных плотностей кости и спонгиозы и различных кортикальных толщин. Теоретические расчеты были сопоставлены с аналогичными результатами имитационного моделирования для «больших» костных сегментов (модели 1–12 в таблице 2).

Таблица 2

Параметры моделей «больших» фантомов:  $\rho_k$  – плотность костной ткани; *Tb.Th* – трабекулярная толщина; *Tb.Sp* – межтрабекулярное расстояние; *Ct.Th* – кортикальная толщина

[Table 2

Parameters of «large» phantoms;  $\rho_k$  – bone tissue density; *Tb.Th* – trabecular thickness; *Tb.Sp* – trabecular separation; *Ct.Th* – cortical thickness]

N	Геометрическая форма [Geometric shape]	Линейные размеры, см [linear dimensions, cm]	$\rho_k$ , г см <sup>-3</sup> [g cm <sup>-3</sup> ]	Tb.Th, см [cm]	Tb.Sp, см [cm]	BV/TV	Ct.Th, см [cm]
1	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	2,64×1,16×0,72×0,72×1,89	1,65	0,011	0,0388	0,37	0,04
2	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	2,64×1,16×0,72×0,72×1,89	1,65	0,011	0,0388	0,37	0,05
3	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	3,4×1,8×1,12×1,12×3,58	1,66	0,016	0,0538	0,22	0,06
4	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	3,4×1,8×1,12×1,12×3,58	1,66	0,016	0,0538	0,22	0,07
5	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	6,82×2,5×1,66×1,66×4,94	1,7	0,024	0,054	0,25	0,11
6	Эллиптический цилиндр $l \times m \times H$ [elliptic cylinder]	2,3×2,3×4,94	1,7	0,024	0,054	0,35	0,13
7	Эллиптический цилиндр $l \times m \times H$ [elliptic cylinder]	1,66×1,66×3	1,7	0,024	0,0538	0,25	0,37
8	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	2,55×0,91×0,91×0,91×1,6	1,66	0,0174	0,058	0,23	0,04
9	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	1,98×1,98×0,91×0,91×1,6	1,66	0,0174	0,058	0,23	0,05
10	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	4,56×1,47×1,47×1,47×2,72	1,7	0,0208	0,058	0,21	0,075
11	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	3,24×3,24×1,47×1,47×2,72	1,7	0,0208	0,058	0,21	0,09
12	Эллиптический цилиндр $l \times m \times H$ [elliptic cylinder]	1,47×1,47×3	1,7	0,0208	0,058	0,21	0,25

$l \times m \times H$  – оси эллиптического основания цилиндра и высота;  $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$  – оси верхнего и нижнего эллиптических оснований деформированного цилиндра и высота

[ $l \times m \times H$  – axes of the elliptical base of cylinder and the height;  $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$  – axes of upper and lower elliptical base of deformed cylinder and the height]

«Малые» фантомы

Эффект плотности оценивался консервативно путем сопоставления результатов имитационного моделирования, выполненного для моделей 13–18 (табл. 3) при 2 значениях плотности: 1,65 г см<sup>-3</sup> и 1,9 г см<sup>-3</sup>.

Результаты и обсуждение

Вариабельность химического состава кости как фактор неопределенности оценок  $DF(AM \leftarrow TBV)$  и  $DF(AM \leftarrow CBV)$

Сопоставление результатов расчетов  $DF(AM \leftarrow TBV)$  и  $DF(AM \leftarrow CBV)$  для 2 различных химических составов, характерных для костей скелета и дентина зубов (при прочих равных параметрах) приведены в таблице 4.

Как видно из таблицы 4,  $DF$ , полученные для альтернативного химического состава, систематически выше таковых, полученных для кости. Однако эта разница не превышает 3,5%. Иными словами, изменение элементного состава кости, а именно снижение доли кальция и фосфора, увеличение доли водорода, углерода, серы и азота и включение следовых количеств железа и цинка, не приводит к существенному изменению  $DF$ . Влияние индивидуальной изменчивости химического

состава кости на величины  $DF$  было консервативно принято как  $\pm 4\%$ .

Влияние плотности кости на формирование поглощенной дозы в ККМ

Большинство авторов, исследовавших плотность костной ткани, указывают на очень небольшую индивидуальную вариабельность этого параметра [13–15] – от 1,5 до 3%. Примем значение 3% в качестве характеристики вариабельности плотности костной ткани.

«Большие» фантомы

Рассмотрим формирование дозы в ККМ, если изотопы стронция инкорпорированы в трабекулярной кости. Доля костной ткани в спонгиозе ( $BV/TV$ ) варьирует в разных участках скелета от 0,13 до 0,52 [21], и изменения плотности костной ткани в диапазоне 1,65–1,9 г см<sup>-3</sup> не приводят к значительному изменению средней плотности спонгиозы (<4%) из-за большой доли костного мозга. Средняя длина свободного пробега электронов в спонгиозе (0,15–0,22 см) значительно больше, чем средняя толщина трабекул (0,0075–0,029 см). Следовательно,  $\bar{E}(BM \leftarrow TBV)$  практически не зависит от плотности кости

Таблица 3

Параметры моделей «малых» фантомов:  $\rho_k$  – плотность костной ткани;  $Tb.Th$  – трабекулярная толщина;  $Tb.Sp$  – межтрабекулярное расстояние;  $Ct.Th$  – кортикальная толщина

[Table 3]

Parameters of «small» phantoms;  $\rho_k$  – bone tissue density;  $Tb.Th$  – trabecular thickness;  $Tb.Sp$  – trabecular separation;  $Ct.Th$  – cortical thickness]

N	Геометрическая форма [Geometric shape]	Линейные размеры, см [linear dimensions, cm]	$\rho_k$ , г см <sup>-3</sup> [g cm <sup>-3</sup> ]	Tb.Th, см [cm]	Tb.Sp, см [cm]	BV/TV	Ct.Th, см [cm]
13	Эллиптический цилиндр $l \times m \times H$ [elliptic cylinder]	0,38×0,38×8,9	1,65; 1,9	1,9	0,012	0,0248	0,22
14	Эллипсоид $l \times m \times n$ [ellipsoid]	0,39×0,39×0,61	1,65; 1,9	1,9	0,012	0,0248	0,22
15	Эллиптический цилиндр $l \times m \times H$ [elliptic cylinder]	0,6×0,6×3	1,65; 1,9	1,9	0,01	0,036	0,28
16	Деформированный цилиндр $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$ [deformed cylinder]	1,72×0,6×0,6×0,6×1,34	1,65; 1,9	1,9	0,01	0,036	0,28
17	Эллиптический цилиндр $l \times m \times H$ [elliptic cylinder]	1,12×1,12×0,3	1,65; 1,9	1,9	0,016	0,0538	0,22
18	Эллиптический цилиндр $l \times m \times H$ [elliptic cylinder]	0,91×0,91×3	1,66; 1,9	1,9	0,0174	0,058	0,22

$l \times m \times H$  – оси эллиптического основания цилиндра и высота;  $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$  – оси верхнего и нижнего эллиптических оснований деформированного цилиндра и высота;  $l \times m \times n$  – оси эллипсоида

[ $l \times m \times H$  – axes of the elliptical base of cylinder and the height;  $l_u \times m_u \times l_l \times m_l \times H$  – axes of upper and lower elliptical base of deformed cylinder and the height;  $l \times m \times n$  – axes of the ellipsoid]

Таблица 4

Сравнение  $DF(AM \leftarrow TBV)$  и  $DF(AM \leftarrow CBV)$ , рассчитанных на основе разных элементных составов сред, ( $10^{-11}$  Гр с<sup>-1</sup>)/(Бк г<sup>-1</sup>)

[Table 4]

Comparison of  $DF(AM \leftarrow TBV)$  and  $DF(AM \leftarrow CBV)$  calculated based on different media elemental composition,  $10^{-11}$  (Gy s<sup>-1</sup>)/(Bq g<sup>-1</sup>)

Химический состав кости [Chemical composition]	<sup>90</sup> Sr		<sup>89</sup> Sr	
	$DF(AM \leftarrow TBV)$	$DF(AM \leftarrow CBV)$	$DF(AM \leftarrow TBV)$	$DF(AM \leftarrow CBV)$
Основной [Basic]	3,45	2,49	1,97	1,21
Альтернативный [Alternative]	3,51	2,57	2,00	1,25
Разница, % [Difference, %]	1,74	3,21	1,52	3,31

в заданном диапазоне. Однако масса трабекулярной кости пропорциональна плотности. Другими словами,  $DF_{1,9}(AM \leftarrow TBV)$ , рассчитанный для «больших» костных сегментов с плотностью кости, равной 1,9 г см<sup>-3</sup>, может быть приведен к заданному значению плотности  $\rho_{bone}$  умножением его на  $\rho_k/1,9=0,526\rho_k$  (уравнение 2).

$$DF(AM \leftarrow TBV) = 0,526 \times DF_{1,9}(AM \leftarrow TBV) \times \rho_k \quad (2)$$

где  $DF_{1,9}(AM \leftarrow TBV) = 0,28 \left(1 - e^{-0,897 \frac{BV}{TV}}\right) \times 10^{-11}$  (Гр с<sup>-1</sup>), (Бк г<sup>-1</sup>), согласно [16].

В таблице 5 представлены результаты сравнения теоретических расчетов, согласно уравнению (2), с результатами имитационного моделирования методом Монте-Карло (численный эксперимент).

Как видно из таблицы 5, теоретические расчеты и численный эксперимент хорошо согласуются в пределах неопределенности аналитического метода, которая на моделях с плотностью костной ткани 1,9 г см<sup>-3</sup> была оценена как 6% [16]. Аналогичные результаты получены и для <sup>89</sup>Sr. Это подтверждает тот факт, что вариация  $\rho_k$  в пределах 3% практически не оказывает влияния на

$\bar{\epsilon}(BM \leftarrow TBV)$  в больших моделях и приводит к аналогичному значению неопределенности  $DF$ , так как  $DF$  прямо пропорционален плотности кости.

Таблица 5

Сравнение результатов численного эксперимента, имитирующего распад <sup>90</sup>Sr в трабекулярной кости, с теоретическими расчетами  $DF(AM \leftarrow CBV)$  для «больших» фантомов

[Table 5]

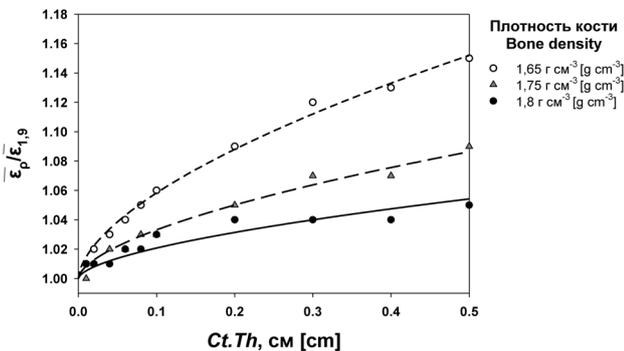
Comparison of the results of a numerical experiment simulating the decay of <sup>90</sup>Sr in the trabecular bone with theoretical calculations of  $DF(AM \leftarrow CBV)$  for «large» phantoms]

N	$DF^*(AM \leftarrow TBV) * 10^{-11}$ (Гр с <sup>-1</sup> )/(Бк г <sup>-1</sup> ) [Gy s <sup>-1</sup> ]/(Bq g <sup>-1</sup> )		Разница с уравнением (2), % [Difference with Eqn. (2), %]
	Численный эксперимент [numerical experiment]	Уравнение (2) [Eqn. (2)]	
1	7,01	6,84	7
2	6,95	6,84	7
3	4,74	4,38	5

Окончание таблицы 5

N	DF* (AM←TBV)*10 <sup>-11</sup> (Гр с <sup>-1</sup> )/(Бк г <sup>-1</sup> ) [Gy s <sup>-1</sup> ]/(Bq g <sup>-1</sup> )		Разница с уравнением (2), % [Difference with Eqn. (2), %]
	Численный эксперимент [numerical experiment]	Уравнение (2) [Eqn. (2)]	
5	5,51	5,03	6
6	7,25	6,73	7
7	4,66	5,03	5
8	4,15	4,56	4
9	4,26	4,38	4
10	4,54	4,3	5
11	4,43	4,3	4
12	4,14	4,3	4
Средняя разница и диапазон значений, % [Mean difference and the range of values, %]			6 (2–9)

Как видно из таблиц 2–3, значения *Ct.Th* могут быть сопоставимы и даже превышать  $\lambda_{\beta}(\bar{E})$  электронов в компактной кости (в приближении непрерывного замедления). Поэтому  $\bar{\epsilon}(BM\leftarrow CBV)$  должна быть чувствительна как к плотности кости, так и к величине *Ct.Th*. На рисунке 1 показана зависимость отношения энергии ( $\bar{\epsilon}_p/\bar{\epsilon}_{1,9}$ ), поглощенной в спонгиозе при заданной плотности кости ( $\rho_k$ ) к таковой при плотности 1,9 г см<sup>-3</sup>. Эта зависимость характерна как для спектра излучения <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y, так и для <sup>89</sup>Sr.



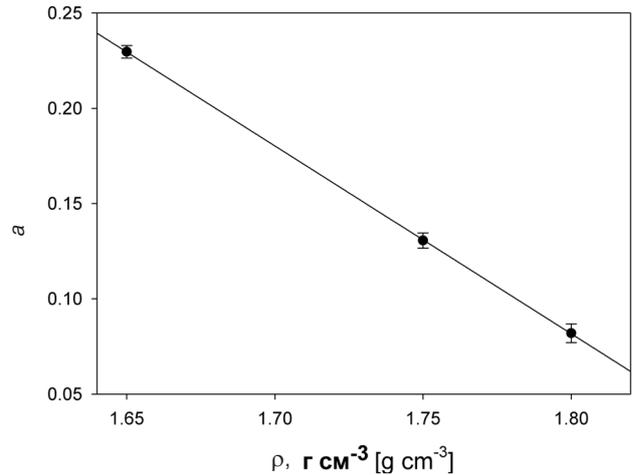
**Рис. 1.** Отношение ( $\bar{\epsilon}_p/\bar{\epsilon}_{1,9}$ ) энергии, поглощенной в спонгиозе при заданной плотности кости (1,65, 1,75 и 1,8 г см<sup>-3</sup>) к таковой при плотности 1,9 г см<sup>-3</sup> как функция *Ct.Th*. Точки – результаты численного эксперимента. Линии – сглаживание данных степенной функцией

**[Fig. 1.** The ratio ( $\bar{\epsilon}_p/\bar{\epsilon}_{1,9}$ ) of the energy absorbed in spongiosa at a given bone density (1.65, 1.75 and 1.8 g cm<sup>-3</sup>) to that at a density of 1.9 g cm<sup>-3</sup> as a function of *Ct.Th*. Points are the results of a numerical experiment. Lines are the data fitting by a power function]

Результаты расчетов для каждой фиксированной плотности хорошо сглаживаются ( $r^2 > 0,86$ ;  $p < 0,01$ ) степенной функцией вида (уравнение 3):

$$\bar{\epsilon}_p/\bar{\epsilon}_{1,9} = 1 + a \times Ct.Th^{0,5956} \quad (3)$$

Показатель степени у всех 3 вариантов совпал. Коэффициент *a* зависит от плотности кости. Рисунок 2 иллюстрирует линейный характер зависимости подгоночного коэффициента *a* как функции от плотности кости.



**Рис. 2.** Линейная зависимость подгоночного коэффициента *a* в уравнении (3) как функция от плотности кости ( $r^2=1$ )  
**[Fig. 2.** Linear dependence of the fitting coefficient *a* in the Eqn. (3) as a function of bone density ( $r^2=1$ )

Уравнение линейной зависимости (см. рис. 2) имеет вид  $a(\rho_k) = 1,857 - 0,986 \times \rho_k$ . Тогда уравнение (3) можно переписать как уравнение (4):

$$\bar{\epsilon}_p/\bar{\epsilon}_{1,9} = 1 + (1,857 - 0,986 \times \rho_k) \times Ct.Th^{0,5956} \quad (4)$$

Очевидно, что  $\bar{\epsilon}_p/\bar{\epsilon}_{1,9}$  тем больше отличается от единицы, чем больше значение *Ct.Th*. Учитывая, что, как и в случае с источником в трабекулярной кости, необходимо принять во внимание и изменение в соотношении масс ткани-источника и ткани-мишени ( $0,526\rho_k$ ),  $DF(AM\leftarrow CBV)$  можно выразить через  $DF_{1,9}(AM\leftarrow CBV)$  как уравнение (5):

$$DF(AM \leftarrow CBV) = 0,526 \times DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV) \times \rho_k \times (1 + (1,857 - 0,986 \times \rho_k) \times Ct.Th^{0,5956}), \quad (5)$$

где  $DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV) = 12,2e^{-4,98Ct.Th}(1 - e^{-0,897 \times \frac{BV}{TV}}) \times 10^{-11}$  (Гр с<sup>-1</sup>). (Бк г<sup>-1</sup>), согласно [18].

В таблице 6 представлены результаты сравнения теоретических расчетов с результатами имитационного моделирования методом Монте-Карло.

В среднем относительная стандартная неопределенность предсказаний аналитической модели равна 8% [16]. Согласно таблице 6, использование уравнения (5) не приводит к снижению погрешности *DF*. Иными словами,  $DF(AM\leftarrow CBV)$  в «больших» моделях практически не чувствителен к вариациям плотности. Аналогичные результаты получены и для <sup>89</sup>Sr. Это объясняется тем, что поглощение энергии в ККМ (уравнение 4) тем больше, чем меньше значение плотности костной ткани. При этом соотношение масс прямопропорционально плотности. Иными словами, имеем 2 противоположно направленных влияния плотности на *DF*.

Варьируя  $\rho_k$  в уравнении (5), согласно нормальному распределению, получаем распределение  $DF(AM\leftarrow CBV)$ . На рисунке 3 представлен пример распределения значений множителя  $0,526 \times \rho_k \times (1 + (1,857 - 0,986 \times \rho_k) \times Ct.Th^{0,5956})$  при вариации  $\rho_k$  в пределах 3% относительно среднего значения, равного 1,7 г см<sup>-3</sup> при толщине кортикального слоя

Таблица 6

Сравнение результатов численного эксперимента, имитирующего распад <sup>90</sup>Sr в кортикальной кости, с теоретическими расчетами  $DF(AM \leftarrow CBV)$  для «больших» костных сегментов без поправки на плотность ( $DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV)$ ) и с таковой (уравнение 5)

[Table 6

Comparison of the results of a numerical experiment simulating the decay of <sup>90</sup>Sr in the cortical bone with theoretical calculations of  $DF(AM \leftarrow CBV)$  for «large» bone segments without ( $DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV)$ ) and with (Eqn. 5) adjustment for density]

N	$DF(AM \leftarrow CBV) \cdot 10^{-11}$ (Гр с <sup>-1</sup> )/(Бк г <sup>-1</sup> ) [Gy s <sup>-1</sup> ]/(Bq g <sup>-1</sup> )			Разница с $DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV)$ , % [Difference with $DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV)$ , %]	Разница с уравнением (5), % [Difference with Eqn. (5), %]
	Численный эксперимент [numerical experiment]	$DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV)$	Уравнение (5) [Eqn. (5)]		
1	1,02	1,10	0,97	8	5
2	1,20	1,34	1,18	11	1
3	1,03	1,07	0,96	4	7
4	1,17	1,21	1,08	4	7
5	1,03	0,99	0,91	4	11
6	1,35	1,34	1,23	1	8
7	3,87	3,54	3,42	9	12
8	1,11	1,25	1,11	13	0
9	1,03	1,15	1,02	12	1
10	1,18	1,18	1,07	0	9
11	1,03	1,08	0,98	4	5
12	3,53	3,69	3,5	5	1
Средняя разница и диапазон значений, % [Mean difference and the range of values, %]				6 (0–13)	6 (0–12)

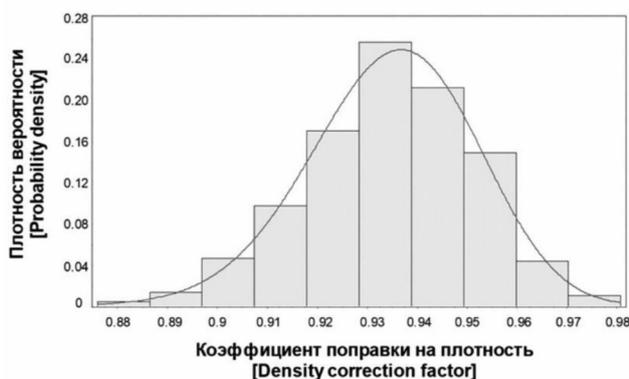


Рис. 3. Распределение поправок, приводящих  $DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV)$  к таковым  $\rho = 1,7 \pm 0,05$  г см<sup>-3</sup> при  $Ct.Th = 0,1$  см. Линия – сглаживание гистограммы функцией нормального распределения

[Fig. 3. Distribution of correction factors adjusting  $DF_{1,9}(AM \leftarrow CBV)$  to those with  $\rho = 1,7 \pm 0,05$  g cm<sup>-3</sup> at  $Ct.Th = 0,1$  cm. Line is smoothing of the histogram by the normal distribution function]

0,1 см. Оно также хорошо описывается нормальным распределением с CV 1,7%.

«Малые» фантомы

В таблице 7 представлено сравнение результатов имитационного моделирования (численный эксперимент) для плотности костной ткани, типичной для новорожденных (1,65 г см<sup>-3</sup>), и для таковой, типичной для взрослых (1,9 г см<sup>-3</sup>), при прочих равных параметрах (табл. 7).

Как видно из таблицы 7, средняя разница между оценками с минимальной и максимальной плотностью кости для  $DF(AM \leftarrow TBV)$  равна 6%.  $DF(AM \leftarrow CBV)$  более чувствителен к плотности костной ткани, и различия в среднем составляют 13%. Аналогичные результаты были получены и для <sup>89</sup>Sr. Эти значения могут быть консервативно приняты как неопределенности оценки доз на ККМ, связанные с индивидуальной изменчивостью плотности кости у «малых» фантомов.

Заключение

Было показано, что вариации химического состава не вносят дополнительную погрешность более  $\pm 4\%$  в значение поглощенной дозы в ККМ. Именно эта величина была консервативно принята в качестве стохастической погрешности за счет неопределенности этого параметра модели. Для вычислительных фантомов с линейными размерами спонгиозы, превышающими  $2\lambda_g(\bar{E})$  (~ 0,44 см), индивидуальная изменчивость плотности кости приводит к аналогичной по величине неопределенности как  $DF(AM \leftarrow TBV)$ , так и  $DF(AM \leftarrow CBV)$ , то есть не превышает 3%. Однако для моделей меньших размеров влияние вариации плотности становится больше и приводит к неопределенностям в 6% и 13% как для  $DF(AM \leftarrow TBV)$ , так и для  $DF(AM \leftarrow CBV)$  соответственно. Иными словами, модели сегментов малых размеров более чувствительны к индивидуальной изменчивости плотности кости, что особенно выражено для  $DF(AM \leftarrow CBV)$ . Таким образом, согласно закону распространения неопределенностей, полная неопределенность оценки коэффициентов перехода от удельной активности изотопов Sr

Таблица 7

Сравнение результатов численного эксперимента, имитирующего распад  $^{90}\text{Sr}$  в кортикальной и трабекулярной кости ткани «малых» моделей с плотностями, равными  $1,65 \text{ г см}^{-3}$  и  $1,9 \text{ г см}^{-3}$

[Table 7

Comparison of the results of a numerical experiment simulating the decay of  $^{90}\text{Sr}$  in the cortical and trabecular bone of «small» models with densities equal to  $1.65 \text{ g cm}^{-3}$  and  $1.9 \text{ g cm}^{-3}$ ]

N	$DF(AM \leftarrow TBV) \cdot 10^{-11}$ , (Гр с <sup>-1</sup> )/(Бк г <sup>-1</sup> ) [(Gy с <sup>-1</sup> )/(Bq g <sup>-1</sup> )]		Разница, % [Difference, %]	$DF(AM \leftarrow CBV) \cdot 10^{-11}$ , (Гр с <sup>-1</sup> )/(Бк г <sup>-1</sup> ) [(Gy с <sup>-1</sup> )/(Bq g <sup>-1</sup> )]		Разница, % [Difference, %]
	$\rho_k = 1,65 \text{ г см}^{-3} [\text{g cm}^{-3}]$	$\rho_k = 1,9 \text{ г см}^{-3} [\text{g cm}^{-3}]$		$\rho_k = 1,65 \text{ г см}^{-3} [\text{g cm}^{-3}]$	$\rho_k = 1,9 \text{ г см}^{-3} [\text{g cm}^{-3}]$	
13	1,69	1,88	11	2,58	2,92	13
14	1,31	1,45	10	3,66	4,1	12
15	6,21	6,53	5	3,63	4,07	12
16	1,3	1,41	8	4,69	5,22	11
17	4,92	4,91	0	5,3	4,22	20
18	4,8	4,93	3	3,57	3,96	11
Средняя разница и диапазон значений [Mean difference and the range of values]			6 0–11			13 11–20

в костной ткани в единицы мощности поглощенной дозы в ККМ будет:

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

Следует отметить, что эффект индивидуальной вариабельности не может быть минимизирован. Эта неопределенность, присущая объекту исследования, ограничивает возможность точнее оценить индивидуальную дозу. Полученные величины сопоставимы с неопределенностью измерений активностей радионуклидов в биологических образцах и даже меньше (в зависимости от метода). Однако, помимо физико-химических параметров, при построении вычислительных фантомов используются морфометрические параметры костей и распределение костного мозга внутри скелета. Изменчивость этих параметров также должна быть проанализирована и учтена. Полученные в настоящей работе результаты будут в дальнейшем использованы при оценке неопределенности ретроспективных оценок доз на ККМ с учетом вариабельности всех параметров модели.

#### 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. Krestina 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. PubMed PMID: 24129230; PubMed Central PMCID: PMC3844904.
2. Leuraud K., Richardson D.B., Cardis E., et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study // Lancet Haematology. 2015. 2:e276–e281. DOI: 10.1016/S2352-3026(15)00094-0. PubMed PMID: 26436129; PubMed Central PMCID: PMC4587986.
3. Соснина С.Ф., Окатенко П.В., Юркин А.М., и др. Лейкомогенный риск и темп накопления радиационной дозы, Сообщение 1: Характеристика исследуемой группы работников производственного объединения «МАЯК» // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12. № 4. С. 18–28. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-18-28>.
4. 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.
5. 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. PubMed PMID: 33677652.
6. 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 Jul;44(1):128–34. PMID: 22386603.
7. Seifert A.C., Wehrli S.L., Wehrli F.W. Bi-component T2 \* analysis of bound and pore bone water fractions fails at high field

- strengths// NMR in Biomedicine. 2015. Vol. 28, № 7. P. 861-872. DOI: 10.1002/nbm.3305. PubMed PMID: 25981785. PubMed Central PMCID: PMC4478152.
8. Li C., Seifert A.C., Rad H.S., et al. Cortical bone water concentration: dependence of MR imaging measures on age and pore volume fraction// Radiology. 2014. Vol. 272, № 3. P. 796-806. DOI: 10.1148/radiol.14132585. PubMed PMID: 24814179. PubMed Central PMCID: PMC4263649.
  9. Saiki M., Takata M.K., Kramarski S., Borelli A. Instrumental neutron activation analysis of rib bone samples and of bone reference materials // Biological Trace Element Research. 1999. Vol. 71-72. P. 41-46. DOI: 10.1007/BF02784189. PubMed PMID: 10676477.
  10. Zaichick V., Tzaphlidou M. Determination of calcium, phosphorus, and the calcium/phosphorus ratio in cortical bone from the human femoral neck by neutron activation analysis // Applied radiation and isotopes. 2002. Vol. 56, № 6. P. 781-786. DOI: 10.1016/s0969-8043(02)00066-0. PubMed PMID: 12102333.
  11. Havaladar R., Pilli S.C., Putti B.B. Effects of ageing on bone mineral composition and bone strength // IOSR Journal of Dental and Medical Sciences (IOSRJDMS). 2012. Vol. 1, № 3. P. 12-16. DOI:10.9790/0853-0131216.
  12. Ziola-Frankowska A., Kubaszewski Ł., Dąbrowski M., et al. The Content of the 14 Metals in Cancellous and Cortical Bone of the Hip Joint Affected by Osteoarthritis // BioMed Research International. 2015. Vol. 2015. P. e815648. DOI: 10.1155/2015/815648. PubMed PMID: PMID: 26357659. PubMed Central PMCID: PMC4555358.
  13. Woodard H.Q., White D.R. The composition of body tissues // The British journal of radiology. 1986. Vol. 59, № 708. P. 1209-1218. DOI: 10.1259/0007-1285-59-708-1209. PubMed PMID: 3801800.
  14. Gong J.K., Arnold J.S., Cohn S.H. Composition of trabecular and cortical bone // The Anatomical Record. 1964. Vol. 149. P. 325-331. DOI: 10.1002/ar.1091490303. PubMed PMID: 14208979.
  15. Snyder S.M., Schneider E. Estimation of mechanical properties of cortical bone by computed tomography // Journal of Orthopaedic Research. 1991 Vol. 9, № 3. P. 422-431. DOI: 10.1002/jor.1100090315. PubMed PMID: 2010847
  16. Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Волчкова А.Ю. Аналитическое описание дозообразования в костном мозге от <sup>90</sup>Sr, инкорпорированного в кальцифицированных тканях // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 3. С. 72-82.
  17. 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. PubMed PMID: 14506981.
  18. ICRP, 1995. Basic Anatomical & Physiological Data for use in Radiological Protection – The Skeleton. ICRP Publication 70 // Annals of the ICRP. 1995. Vol. 25, № 2. P. 1-80. PMID: 8659813.
  19. 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. V. 11. № 2. P. 44-57. DOI: 10.14529/mmp180204.
  20. 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. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605. PubMed PMID: 34648511. PubMed Central PMCID: PMC8516275.
  21. 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
  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. Т. 24, № 4. С. 74 – 82. DOI: 10.47183/mes.2022.045
  23. 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. PubMed PMID: 31764420
  24. Werner C.J., Armstrong J.C., Brown F.B., et al. MCNP User's Manual Code Version 6.2. Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-17-29981. Los Alamos, NM, USA. 2017. URL: [https://mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/TechReport\\_2017\\_LANL\\_LA-UR-17-29981\\_WernerArmstrongEtAl.pdf](https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2017_LANL_LA-UR-17-29981_WernerArmstrongEtAl.pdf) (Дата обращения: 15.05.2023)
  25. Watchman C.J., Bourke V.A., Lyon J.R., 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. Vol. 48, № 4. P. 645-654. DOI: 10.2967/jnumed.106.035337. PubMed PMID: 17401104.
  26. 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. PubMed PMID: 19749092. PubMed Central PMCID: PMC2774549.
  27. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External radiation Exposures. ICRP Publication 116. Annals of the ICRP. 2010. Vol. 40, No 2-5. P. 1-257. DOI: 10.1016/j.icrp.2011.10.001. Erratum in: Ann ICRP. 2015 Jul;44(1):128-34. PMID: 22386603.
  28. Официальный сайт OECD Nuclear Energy Agency (NEA). URL: [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_39910/janis](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_39910/janis) (Дата обращения: 27.04.2023)
  29. Shishkina E.A., Göksu H.Y., El-Faramawy N.A., et al. Assessment of <sup>90</sup>Sr concentration in dental tissue using thin-layer beta-particle detectors and verification with numerical calculations // Radiation Research. 2005. Vol. 163, № 4. P. 462 – 467. DOI: 10.1667/rr3317. PubMed PMID: 15799703.

Поступила: 03.05.2023 г.

**Шишкина Елена Анатольевна** – доктор биологических наук, исполняющий обязанности заведующей 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@urcrn.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. 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

## The uncertainty of estimation of doses to the bone marrow from $^{89,90}\text{Sr}$ due to the variability of the chemical composition and bone density

Elena A. Shishkina<sup>1,2</sup>, Pavel A. Sharagin<sup>1</sup>, Evgenia I Tolstykh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

*Dosimetric modeling of radiation transport in skeletal bone tissues using computational phantoms provides the doses of internal exposure to active marrow. Computational phantoms of ICRP are created for reference people with anatomical and physiological characteristics typical of an average individual. The doses calculated with such phantoms will correspond to certain population-average values. Individual variability will introduce a stochastic component of uncertainty into the dose estimation. The objective of this study is to assess the influence of variability of chemical composition and bone density on the results of dosimetric modeling. The phantoms are represented by simple geometry figures filled with trabecular structures and bone marrow and covered with a cortical layer. Radiation transport was simulated using the Monte Carlo method. The dose factors to convert the radionuclide activity concentration to absorbed dose rates in active marrow were calculated assuming uniform radionuclide distribution in the volume of the trabecular and cortical bone. As a result of the numerical experiments, it has been shown that variations in chemical composition do not introduce an error of more than  $\pm 4\%$  into dosimetric modeling. The effect of bone density on active marrow dose formation depends on the size of a phantom. For computational phantoms with linear dimensions exceeding two electron free path lengths ( $\sim 0.44$  cm), variability of bone density within  $\pm 3\%$  leads to a similar relative uncertainty of the dose conversion factor. However, for smaller phantoms, bone density variability leads to uncertainties of 6% or 13% for a source deposited in the trabecular or cortical bone, respectively. The results obtained will be used to assess the uncertainty of bone marrow dosimetry, taking into account the uncertainty of all parameters including the variability of morphometric characteristics of bones, the variability of the active marrow distribution in skeletal sites, as well as the uncertainties introduced by model approximations.*

**Key words:** computational phantoms, internal exposure, active marrow, Strontium, uncertainty, individual variability, chemical composition, density.

### Author's personal contribution

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

Pavel A. Sharagin – 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

The work was funded 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.

**Elena A. Shishkina**

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

## References

- 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.
- Leuraud K, Richardson D.B, Cardis E., Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *Lancet Haematology*. 2015;2:e276–e281. DOI: 10.1016/S2352-3026(15)00094-0. PubMed PMID: 26436129; PubMed Central PMCID: PMC4587986.
- Sosnina SF, Okatenko PV, Yurkin AM, Rogacheva SA, Gruzdeva EA, Sokolnikov ME. Leukemia risk and the pattern of dose accumulation. Part 1: Characteristics of the study group of the Mayak Production Association personnel. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 18–28. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-18-28>.
- 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. *Chemical Physics*. 2021;40(12): 48–55. (In Russian) DOI: 10.31857/S0207401X2112013X.
- 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.
- 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: *Ann ICRP*. 2015;44(1): 128–34. PMID: 22386603.
- Seifert AC, Wehrli SL, Wehrli FW. Bi-component T2 \* analysis of bound and pore bone water fractions fails at high field strengths. *NMR Biomed*. 2015; 28 (7): 861–872. DOI: 10.1002/nbm.3305. PubMed PMID: 25981785. PubMed Central PMCID: PMC4478152.
- Li C, Seifert AC, Rad HS, Bhagat YA, Rajapakse CS, Sun W et al. Cortical bone water concentration: dependence of MR imaging measures on age and pore volume fraction. *Radiology*. 2014;272(3): 796–806. DOI: 10.1148/radiol.14132585. PubMed PMID: 24814179. PubMed Central PMCID: PMC4263649.
- Saikii M, Takata MK, Kramarski S, Borelli A. Instrumental neutron activation analysis of rib bone samples and of bone reference materials. *Biological Trace Element Research*. 1999;71–72: 41–46. DOI: 10.1007/BF02784189. PubMed PMID: 10676477.
- Zaichick V, Tzaphlidou M. Determination of calcium, phosphorus, and the calcium/phosphorus ratio in cortical bone from the human femoral neck by neutron activation analysis. *Applied radiation and isotopes*. 2002;56(6): 781–786. DOI: 10.1016/S0969-8043(02)00066-0. PubMed PMID: 12102333.
- Havaladar R, Pilli SC, Putti BB. Effects of ageing on bone mineral composition and bone strength. *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences (IOSRJDMS)*. 2012;1(3): 12–16. DOI:10.9790/0853-0131216.
- Ziola-Frankowska A, Kubaszewski Ł, Dąbrowski M, Kowalski A, Rogala P, Strzyżewski W, et al. The Content of the 14 Metals in Cancellous and Cortical Bone of the Hip Joint Affected by Osteoarthritis. *BioMed Research International*. 2015;2015: e815648. DOI: 10.1155/2015/815648. PubMed PMID: PMID: 26357659. PubMed Central PMCID: PMC4555358.
- Woodard HQ, White DR. The composition of body tissues. *The British journal of radiology*. 1986;59(708): 1209–1218. DOI: 10.1259/0007-1285-59-708-1209. PubMed PMID: 3801800.
- Gong JK, Arnold JS, Cohn SH. Composition of trabecular and cortical bone. *The Anatomical Record*. 1964;149: 325–331. DOI: 10.1002/ar.1091490303. PubMed PMID: 14208979.
- Snyder SM, Schneider E. Estimation of mechanical properties of cortical bone by computed tomography. *Journal of Orthopaedic Research*. 1991;9(3): 422–431. DOI: 10.1002/jor.1100090315. PubMed PMID: 2010847.
- Shishkina EA, Sharagin PA, Volchkova AYu. Analytical description of dose forming in bone marrow from <sup>90</sup>Sr incorporated in calcified tissues. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of Radiation Safety*. 2021;3: 72–82. (In Russian).
- 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. PubMed PMID: 14506981.
- ICRP, 1995. Basic Anatomical & Physiological Data for use in Radiological Protection – The Skeleton. ICRP Publication 70. *Annals of the ICRP*. 1995;25(2): 1–80. PMID: 8659813.
- 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.
- Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AY, et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description. *PLoS ONE*. 2021;16: 10. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605. PubMed PMID: 34648511. PubMed Central PMCID: PMC8516275.
- 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. (In Russian) DOI: 10.33266/2782-6430-2022-3-25-40
- Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI. Computational phantom for red bone marrow dosimetry from incorporated beta emitters in a newborn baby. *Meditsina ekstremalnykh situatsiy = Extreme Medicine*. 2022;(4):70–77. (In Russian) DOI: 10.47183/mes.2022.045.
- Shishkina EA, Timofeev YS, Volchkova AYu, 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. PubMed PMID: 31764420.
- Werner CJ, Armstrong JC, Brown FB, et al. MCNP User's Manual Code Version 6.2. Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-17-29981. Los Alamos, NM, USA. 2017. URL: [https://mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/TechReport\\_2017\\_LANL\\_LA-UR-17-29981\\_WernerArmstrongEtAl.pdf](https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2017_LANL_LA-UR-17-29981_WernerArmstrongEtAl.pdf) (Accessed: 15.05.2023).
- 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;4 (4): 645–654. DOI: 10.2967/jnumed.106.035337. PubMed PMID: 17401104.
- Bourke VA, Watchman CJ, Reith JD, Jorgensen ML, Dieudonn 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. PubMed PMID: 19749092. PubMed Central PMCID: PMC2774549.
- 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: *Ann ICRP*. 2015 Jul;44(1):128–34. PMID: 22386603.

28. Official website OECD Nuclear Energy Agency (NEA). URL: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_39910/janis](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis) (Accessed: 15.05.2023). layer beta-particle detectors and verification with numerical calculations. *Radiation Research*. 2005;163(4): 462 – 467. DOI: 10.1667/rr3317. PubMed PMID: 15799703.
29. Shishkina EA, Göksu HY, El-Faramawy NA, Semiochkina N. Assessment of <sup>90</sup>Sr concentration in dental tissue using thin-

Received: May 03, 2023

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

ORCID 0000-0003-4464-0889

**Pavel A. Sharagin** – junior researcher the Biophysical Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia

ORCID 0000-0002-1457-4916

**Evgenia I. Tolstykh** – Doctor of biology, Leading researcher of the Biophysical Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia

ORCID 0000-0002-4958-3214

**For citation: Shishkina E.A., Sharagin P.A., Tolstykh E.I. The uncertainty of estimation of doses to the bone marrow from <sup>89,90</sup>Sr due to the variability of the chemical composition and bone density. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 32-43. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-32-43**

## Использование результатов радиационного мониторинга окружающей среды для контроля источника выбросов йода-131 предприятием

А.И. Крышев, В.Г. Булгаков, М.Н. Каткова, О.Н. Полянская, А.А. Бурякова

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Россия

*Выполнен анализ взаимного соответствия данных о годовом выбросе радионуклида предприятием, расчетной модели переноса примеси, использующейся при установлении нормативов предельно допустимых выбросов, и среднегодовой объемной активности радионуклида, определенной с использованием данных радиационного мониторинга приземного слоя воздуха, на примере выброса  $^{131}\text{I}$  акционерным обществом «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова» (г. Обнинск). Показано, что для выброса предприятия в 2013–2022 гг. результаты радиационного мониторинга окружающей среды подтверждают как данные радиационного контроля источника выброса  $^{131}\text{I}$ , так и адекватность расчетной модели переноса примеси. Среднегодовой метеорологический фактор разбавления выброса  $^{131}\text{I}$  предприятием в приземном слое атмосферы, оцененный с использованием данных мониторинга, не превышает значение, полученное с помощью модели расчета переноса примеси. Выявлена сильная корреляция среднегодовой объемной активности  $^{131}\text{I}$  в приземном воздухе, полученной с использованием результатов измерений, и данных радиационного контроля годовых выбросов предприятия. Отсутствует корреляция изменчивости фактора разбавления по расчетным оценкам и данным мониторинга, что может быть связано с неоднородностью выброса  $^{131}\text{I}$  предприятием в течение года.*

**Ключевые слова:** выброс йода-131, мониторинг окружающей среды, радиационный контроль источника, модель атмосферного переноса, фактор разбавления.

### Введение

Согласно руководству по безопасности МАГАТЭ [1], важным и существенным элементом контроля выбросов радиоактивных веществ является регулярный мониторинг – как источника выбросов, так и окружающей среды. В документе [1] отмечается, что одной из задач мониторинга окружающей среды является проверка результатов мониторинга источника выбросов, а сам мониторинг окружающей среды должен быть таким, чтобы обеспечить возможность верификации результатов мониторинга источника посредством отбора проб и выполнения измерений в тщательно выбранных местах вблизи ядерно и радиационно опасного объекта. Приземный слой атмосферного воздуха является компонентом природной среды, который имеет наибольшую функциональную связь с выбросами радионуклидов. Годовая эффективная доза

облучения населения от выбросов предприятия в условиях нормальной эксплуатации прямо пропорциональна среднегодовой объемной активности радионуклидов в приземном слое атмосферного воздуха [2].

Величина среднегодовой объемной активности радионуклида в приземном слое атмосферного воздуха может быть получена двумя независимыми методами:

- инструментальным – с использованием данных радиационного мониторинга окружающей среды;
- расчетным – например, с помощью модели, принятой в методике установления нормативов предельно допустимых выбросов, где используются данные контроля источника выброса (годовой выброс радионуклида) и характеристики, влияющие на рассеивание примеси (геометрические и физические параметры источника, метеорологические условия)<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> Методические рекомендации по расчету нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ из организованных источников в атмосферный воздух применительно для организаций Госкорпорации «Росатом». Утверждены 15.07.2014 г. № 1-1/310-Р. М., Росатом, 2014 [Methodological guidelines for calculating the maximum permissible emissions of radioactive substances from organized sources into the atmosphere for organizations of the State Atomic Energy Corporation «Rosatom». Approved by the State Atomic Energy Corporation «Rosatom» No 1-1/310-P of 15.07.2014. (In Russ.)]

<sup>2</sup> РБ-106-21. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосфер-

Крышев Александр Иванович

Научно-производственное объединение «Тайфун»

Адрес для переписки: 249038, Россия, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4; E-mail: ecomod@yandex.ru

Сопоставление величин среднегодовой объемной активности, полученных инструментальным и расчетным методом (по модели для установления нормативов предельно допустимых выбросов), позволяет проанализировать корректность данных об источнике выброса и адекватность расчетной модели переноса примеси, используемой при расчете годовой эффективной дозы облучения населения и нормативов предельно допустимых выбросов. В данной работе такой анализ выполнен на примере выброса  $^{131}\text{I}$  АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» (г. Обнинск) в период 2013–2022 гг.

Результаты мониторинга содержания  $^{131}\text{I}$  в приземном слое атмосферы г. Обнинска в 1989–1996 гг. и 2004–2013 гг. представлены и проанализированы в работе [3]. В публикации [4] обсуждается использование данных радиационного мониторинга атмосферного воздуха сетью лабораторий с целью идентификации источника выбросов  $^{131}\text{I}$ . В работе [5] проанализирована возможность использования результатов мониторинга для верификации моделей рассеяния выбросов радионуклидов из стационарных источников в городской среде. На основе модельных расчетов переноса  $^{131}\text{I}$  оценивалась годовая доза облучения населения, проживающего в районе расположения НИФХИ [6].

**Цель исследования** – анализ возможности использования метода верификации данных о годовых выбросах радионуклида предприятием в атмосферный воздух на основе результатов радиационного мониторинга окружающей среды.

### Задачи исследования

Задачей исследования является анализ взаимного соответствия данных о годовом выбросе радионуклида предприятием, расчетной модели переноса примеси, используемой при установлении нормативов предельно допустимых выбросов радионуклидов в Госкорпорации «Росатом», и среднегодовой объемной активности радионуклида, определенной с использованием данных радиационного мониторинга приземного слоя воздуха, на примере выброса  $^{131}\text{I}$  АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» (г. Обнинск).

### Материалы и методы

В районе г. Обнинска находится предприятие АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» (далее – НИФХИ), один из видов деятельности которого – производство радиофармацевтических препаратов. В процессе производства образуется  $^{131}\text{I}$ , который в основном задерживается фильтрующими устройствами. Тем не менее, некоторая часть его поступает в атмосферу и обнаруживается системой радиационного мониторинга в приземном воздухе г. Обнинска. Выброс  $^{131}\text{I}$  НИФХИ осуществляется из организованного источника – вентиляционной трубы вы-

сотой 86 м. Другие источники выброса  $^{131}\text{I}$  в г. Обнинске и его окрестностях отсутствуют.

На территории г. Обнинска ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета проводит многолетние наблюдения за радиоактивными аэрозолями и молекулярной фракцией радиоактивного йода из приземного слоя атмосферы. Пункт отбора проб атмосферных аэрозолей и молекулярной фракции радиоактивного йода расположен на площадке высотной метеорологической мачты (ВММ-310) в центре г. Обнинска. Расположение пункта отбора проб – на расстоянии 5,8 км к северо-северо-западу от источника выброса  $^{131}\text{I}$ . Периодичность отбора проб составляет 1 сутки. Отбор проб радиоактивных аэрозолей и молекулярной фракции радиоактивного йода осуществляется с помощью автоматизированной воздухофильтрующей установки (ВФУ) типа УВФ-2 путем прокачки атмосферного воздуха через систему накопительных фильтров.

ВФУ типа УВФ-2 одновременно с отбором проб обеспечивает автоматическое непрерывное измерение объемного расхода воздуха, прокачиваемого за время экспозиции пробы, автоматическое непрерывное измерение поверхностной суммарной  $\beta$ -активности и мощности амбиентного эквивалента дозы  $\gamma$ -излучения (МАЭД) под накопительным фильтром. Вся указанная информация отображается на дисплее и по каналам связи передается на удаленный персональный компьютер. Программное обеспечение обеспечивает дистанционное управление УВФ-2, сбор, накопление, обработку и анализ данных, поступающих с УВФ-2 по каналу связи, выработку «тревожного (алармового) сигнала» для оператора в случае резкого увеличения содержания техногенных радионуклидов в воздухе.

Для отбора проб радиоактивных аэрозолей используется фильтр типа ФПП-15-1,5, для отбора проб молекулярного  $^{131}\text{I}$  – СФМ-2И-ПС. Диапазон измерения объемного расхода воздуха составляет 300–2500 м<sup>3</sup>/ч, с пределом допускаемой основной относительной погрешности определения объема воздуха, прокачанного через фильтр, не более  $\pm 4\%$ . Диапазон измерения мощности амбиентной дозы  $\gamma$ -излучения (для УВФ-2) от 0,05 мкЗв/ч до 10 Зв/ч с пределом допускаемой основной относительной погрешности не более 25%. Диапазон измерения поверхностной  $\beta$ -активности (для УВФ-2) от  $4,4 \cdot 10^{-2}$  до  $2,2 \cdot 10^4$  Бк/см<sup>2</sup>, с пределом допускаемой основной относительной погрешности не более  $\pm 25\%$ <sup>3</sup>.

После отбора экспонированные фильтры в тот же день доставляются в радиометрическую лабораторию. Аэрозольный фильтр прессуется в таблетки диаметром 46 мм и высотой 5–8 мм. Молекулярный фильтр сворачивается и помещается в измерительный контейнер диаметром 140 мм и высотой 100 мм. Для проведения  $\gamma$ -спектрометрического анализа применяется поверенный полупроводниковый детектор из особо чистого германия (GEM60P4-83, «ORTEC»), помещенный в низкофо-

ный воздух. М., Ростехнадзор, 2021 [RB-106-21. Safety guide on nuclear energy use. Recommended methods of parameters calculation which are necessary to prepare and establish permissible limits of radioactive substances discharges into atmosphere. Moscow, Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (Rostechнадзор), 2021. (In Russ.)]

<sup>3</sup> РД 52.18.826-2015 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением компонентов природной среды. Обнинск, 2015. 105 с. [Guidance document 52.18.826-2015 Manual of hydrometeorological stations and posts. Issue 12. Observations on the radioactive contamination of environmental components. Obninsk, 2015, 105 p. (In Russ.)]

новую защитную камеру. Относительная эффективность детектора составляет 60% (1,33 МэВ,  $^{60}\text{Co}$ ), отношение пик/комpton 70:1, ПШПВ – 1,9. Для обработки спектра используется программа «GammaVision». Идентификация  $^{131}\text{I}$  в атмосферных аэрозолях определяется по пику полного поглощения 364,49 кэВ (квантовый выход 81,2%). Поправка на распад радионуклида учитывается на середину срока отбора. Расширенная неопределенность объемной активности  $^{131}\text{I}$  не превышает 50%. Минимальная детектируемая активность в соответствии с методикой<sup>4</sup> составляет  $1 \cdot 10^{-6}$  Бк/м<sup>3</sup>.

Динамика годового выброса  $^{131}\text{I}$  по данным штатного радиационного контроля НИФХИ [7, 8] и среднегодовая объемная активность  $^{131}\text{I}$  в приземном слое воздуха г. Обнинска, определенная с использованием данных измерений НПО «Тайфун» (сумма атмосферных аэрозолей и молекулярной фракции), приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Годовой выброс  $^{131}\text{I}$  НИФХИ по данным штатного радиационного контроля (ТБк/год) и динамика среднегодовой объемной активности  $^{131}\text{I}$  в приземном воздухе г. Обнинска в 2013 – 2022 гг. по данным измерений (Бк/м<sup>3</sup>)**

[Table 1

**Annual discharge of  $^{131}\text{I}$  from NIFHI according to the data of normal radiation control (TBq/year) and dynamics of the annual average volume activity of  $^{131}\text{I}$  in the near-surface air in Obninsk, 2013 – 2022, estimated using data of measurements (Bq/m<sup>3</sup>)**

Год [Year]	Выброс в атмосферный воздух [Atmospheric release]	Среднегодовая объемная активность [Annual average volume activity]
2013	0,12	$(7,3 \pm 2,2) \cdot 10^{-5}$
2014	0,16	$(2,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-5}$
2015	0,85	$(4,8 \pm 1,5) \cdot 10^{-4}$
2016	1,4	$(3,1 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$
2017	1,6	$(4,1 \pm 1,2) \cdot 10^{-4}$
2018	2,2	$(8,8 \pm 2,6) \cdot 10^{-4}$
2019	1,2	$(5,8 \pm 1,7) \cdot 10^{-4}$
2020	1,1	$(3,9 \pm 1,2) \cdot 10^{-4}$
2021	1,3	$(4,1 \pm 1,2) \cdot 10^{-4}$
2022	0,7	$(2,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$

Годовой выброс радионуклида и его среднегодовая объемная активность в атмосферном воздухе связаны между собой такой характеристикой, как среднегодовой метеорологический фактор разбавления выброса в приземном слое атмосферы (далее – фактор разбавления). Фактор разбавления (с/м<sup>3</sup>) равен отношению среднегодовой объемной активности радионуклида в воздухе (Бк/м<sup>3</sup>) к усредненной за год мощности его выброса (Бк/с) [9].

Фактор разбавления выброса  $^{131}\text{I}$  НИФХИ в приземном слое атмосферы в месте расположения пункта мониторинга в г. Обнинске определен для каждого года в период с 2013 по 2022 г. 2 независимыми способами. Фактор разбавления  $G_r$ , с/м<sup>3</sup>, получен с использованием стандар-

тной Гауссовой модели переноса примеси, принятой в методике установления нормативов предельно допустимых выбросов<sup>1</sup>. Фактор разбавления  $G_r$  вычисляется в зависимости от параметров источника (геометрическая высота, линейная и объемная скорость выброса, температура выброса) и метеорологических характеристик, влияющих на рассеивание примеси в атмосфере (повторяемость совместной реализации определенного направления ветра, категории устойчивости атмосферы и градации скорости ветра; температура воздуха в окружающей среде; интенсивность осадков различного типа и др.).

Фактор разбавления  $G_m$ , с/м<sup>3</sup>, получен как отношение среднегодовой объемной активности в атмосферном воздухе по данным радиационного мониторинга, Бк/м<sup>3</sup> (см. табл. 1), к усредненному за год выбросу радионуклида по данным штатного контроля НИФХИ, Бк/с. При обоих способах расчета сделано предположение о равномерном распределении выброса радионуклида в течение года<sup>1,2</sup>.

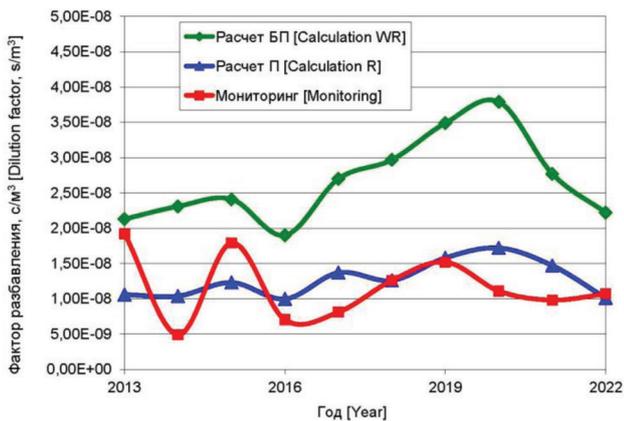
Поскольку методики установления нормативов предельно допустимых выбросов<sup>1,2</sup> предполагают консервативный подход к расчету переноса примеси и оценке годовой эффективной дозы облучения населения, то можно ожидать выполнение соотношения  $G_r \geq G_m$ . Тогда расчетная среднегодовая объемная активность  $^{131}\text{I}$  в приземном воздухе окажется выше или равна полученной по результатам измерений, с учетом неопределенности модельной оценки и данных измерений. Это позволит сделать вывод о том, что результаты радиационного мониторинга окружающей среды подтверждают данные радиационного контроля источника выброса  $^{131}\text{I}$ , а расчетная модель, используемая при установлении нормативов предельно допустимых выбросов, не занижает среднегодовую объемную активность  $^{131}\text{I}$  в приземном воздухе. От корректности оценки источника выброса и среднегодовой объемной активности в приземном воздухе напрямую зависит корректность расчета годовой эффективной дозы облучения населения и норматива предельно допустимого выброса радионуклида.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показана динамика фактора разбавления выброса  $^{131}\text{I}$  НИФХИ в приземном слое атмосферы в 2013–2022 гг. Фактор разбавления  $G_m$  оценен в месте расположения пункта мониторинга в г. Обнинске с использованием данных измерений, фактор разбавления  $G_r$  получен расчетным путем с помощью стандартной Гауссовой модели. Для сравнения на рисунке 1 отображены результаты расчета  $G_r$  с использованием наиболее консервативной модели из методики<sup>1</sup>, не учитывающей тепловой и динамический подъем струи выброса, и более реалистичной модели из той же методики<sup>1</sup>, учитывающей тепловой и динамический подъем струи выброса.

Как видно на рисунке 1, фактор разбавления  $G_r$ , полученный по наиболее консервативной расчетной модели, превышает величину  $G_m$  в 1,5–4,7 раз. Фактор разбавления  $G_r$ , рассчитанный с учетом теплового и динамическо-

<sup>4</sup> МВК 6.1.10-15. Методика контроля радиоактивного загрязнения приземного воздуха и выпадений на поверхность земли в ФГБУ «НПО «Тайфун». Обнинск, 2016, 57 с. [MVK 6.1.10-15. Methods of monitoring the radioactive contamination of surface air and fallout on the surface of the earth in the FGBU «NPO «Typhoon». Obninsk, 2016, 57 p. (In Russ.)]



**Рис. 1.** Динамика фактора разбавления выброса  $^{131}\text{I}$  НИФХИ в приземном слое атмосферы, расчет по модели без учета подъема струи выброса (БП), с его учетом (П) и оценка с использованием данных мониторинга

[Fig. 1. Dynamics of the dilution factor of the  $^{131}\text{I}$  NIFHI release in the surface layer of the atmosphere, calculation according to the model excluding the rise of the release jet (ER), taking it into account (R) and assessment using monitoring data]

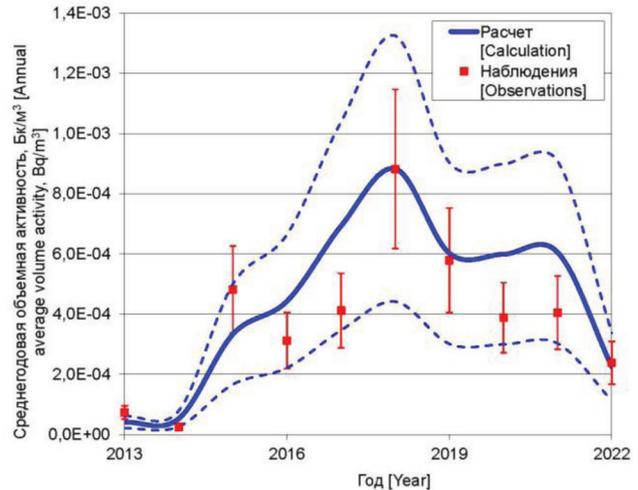
го подъема струи выброса, отличается от величины  $G_m$  в 0,7–1,5 раз. Среднее значение фактора разбавления  $G_m$ , полученное с использованием данных мониторинга в 2013–2022 гг., составляет  $(1,2 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$  с/м<sup>3</sup>. Среднее значение фактора разбавления  $G_r$ , рассчитанное по модели с учетом теплового и динамического подъема струи выброса, составляет  $(1,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$  с/м<sup>3</sup>, а по наиболее консервативной модели –  $(2,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-8}$  с/м<sup>3</sup>.

Таким образом, соотношение  $G_r \geq G_m$  выполняется для выброса  $^{131}\text{I}$  НИФХИ. Результаты радиационного мониторинга окружающей среды подтверждают как данные радиационного контроля источника выброса  $^{131}\text{I}$ , так и адекватность расчетной модели переноса примеси, используемой при установлении нормативов предельно допустимых выбросов. На рисунке 2 представлен результат расчета среднегодовой объемной активности  $^{131}\text{I}$  в пункте мониторинга в г. Обнинске в 2013–2022 гг. по Гауссовой модели с учетом теплового и динамического подъема струи выброса в сравнении с данными измерений.

На рисунке 2 видно, что в течение всего периода времени с 2013 по 2022 г. результаты радиационного мониторинга подтверждали корректность расчетных оценок среднегодовой объемной активности  $^{131}\text{I}$  в приземном слое атмосферы в пункте мониторинга в г. Обнинске и не противоречили данным радиационного контроля источника выброса  $^{131}\text{I}$ .

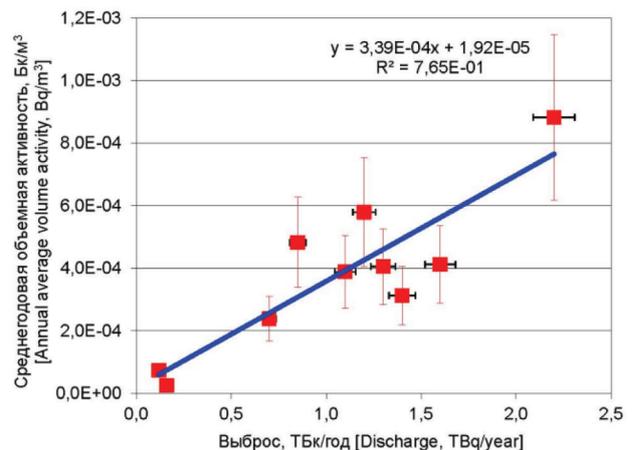
Выявлена сильная корреляция среднегодовой объемной активности  $^{131}\text{I}$  в приземном воздухе, полученной с использованием результатов измерений, и данных радиационного контроля годовых выбросов НИФХИ (рис. 3), коэффициент детерминации  $r^2 = 0,765$ . Столь сильная корреляция подтверждает корректность методики определения выброса  $^{131}\text{I}$ , используемой НИФХИ.

Выборки значений фактора разбавления примеси при выбросе  $^{131}\text{I}$  НИФХИ за каждый год в период 2013–2022 гг. проанализированы с помощью критерия Шапиро – Уилка



**Рис. 2.** Динамика среднегодовой объемной активности (СГОА)  $^{131}\text{I}$  в приземном слое атмосферы в пункте мониторинга в г. Обнинске, расчет по модели и с использованием данных измерений

[Fig. 2. Dynamics of average annual volume activity  $^{131}\text{I}$  in the surface layer of the atmosphere at the monitoring point in Obninsk, calculated by model and using measurement data]



**Рис. 3.** Корреляция между среднегодовой объемной активностью  $^{131}\text{I}$  в приземном слое атмосферы в пункте мониторинга в г. Обнинске, полученной с использованием данных измерений, и годовыми выбросами НИФХИ

[Fig. 3. Correlation between the average annual volume  $^{131}\text{I}$  activity in the surface layer of the atmosphere at the monitoring point in Obninsk, obtained using measurement data, and annual releases of NIFHI]

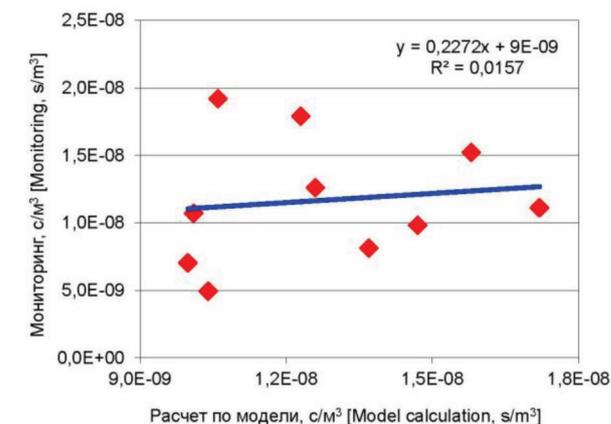
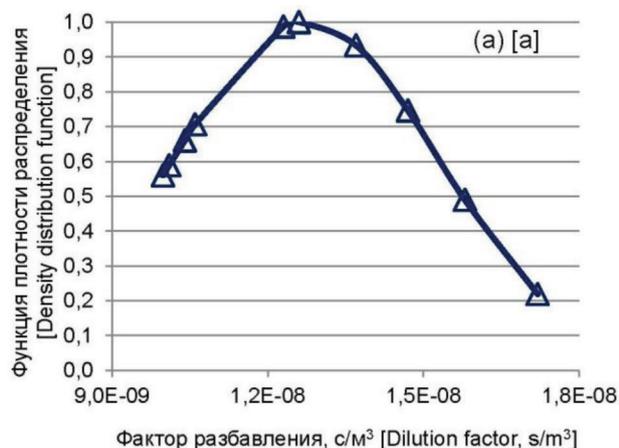
проверки нормальности распределения случайных величин [10]. Нулевая гипотеза  $H_0$  критерия Шапиро – Уилка заключается в том, что случайная величина распределена по нормальному закону. Уровень значимости  $\alpha$  – пороговая величина значимой вероятности ( $p$ -значения), или допустимая вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы – принят равным 0,05. Если  $p$ -значение выше  $\alpha$  и статистика критерия  $W$  выше табличного значения 0,842 для  $N = 10$  и  $\alpha = 0,05$ , то принимается гипотеза  $H_0$ . Для выборки значений фактора разбавления, полученной с использованием данных радиационного мониторинга,

$p$ -значение равно 0,879, статистика критерия Шапиро – Уилка – 0,963. Для выборки значений фактора разбавления, полученной расчетным путем по модели с учетом теплового и динамического подъема струи выброса,  $p$ -значение равно 0,311, статистика критерия Шапиро – Уилка – 0,879. Статистический анализ подтверждает нормальное распределение фактора разбавления примеси при выбросе  $^{131}\text{I}$  НИФХИ при обоих способах оценки (рис. 4).

Значения фактора разбавления  $G_r$  (расчет) и  $G_m$  (мониторинг) варьируют от года к году. Для выброса  $^{131}\text{I}$  НИФХИ в 2013–2022 гг. максимальная и минимальная величина  $G_r$  различается в 1,7 раз,  $G_m$  – в 3,9 раз. В теории причинной изменчивости фактора разбавления является изменчивость среднегодовых метеорологических характеристик рассеивания примеси в разные годы. Несмотря на то, что численные значения  $G_r$  и  $G_m$  хорошо соответствуют друг другу (см. рис. 1), корреляции их изменчивости не выявлено. На рисунке 5 видно отсутствие корреляции изменчивости фактора разбавления выброса  $^{131}\text{I}$  НИФХИ в приземном слое атмосферы, полученного с помощью модели и с использованием данных мониторинга, коэффициент детерминации  $r^2 = 0,016$ .

Возможной причиной отсутствия корреляции изменчивости значений  $G_r$  и  $G_m$  может быть то, что при расчетах делалось предположение об однородности и равномерном распределении выброса радионуклида предприятием в течение года. В случае выбросов НИФХИ это допущение могло не соблюдаться [6], что, тем не менее, не повлияло на корректность расчета численного значения среднегодовой объемной активности  $^{131}\text{I}$  с помощью модели, используемой в методике установления нормативов предельно допустимых выбросов. Вопрос влияния краткосрочных повышенных выбросов ядерно и радиационно опасных объектов на величину годовой эффективной дозы облучения населения и норматив предельно допустимого выброса требует дополнительного исследования.

Ранее на основе модельных расчетов было показано, что годовая доза облучения населения г. Обнинска и его окрестностей от выброса  $^{131}\text{I}$  НИФХИ в атмосферный воздух не превышает 1,7 мкЗв/год, что значительно



**Рис. 5.** Отсутствие корреляции между изменчивостью годовых значений фактора разбавления выброса  $^{131}\text{I}$  НИФХИ в приземном слое атмосферы, рассчитанных по модели и использованием данных мониторинга

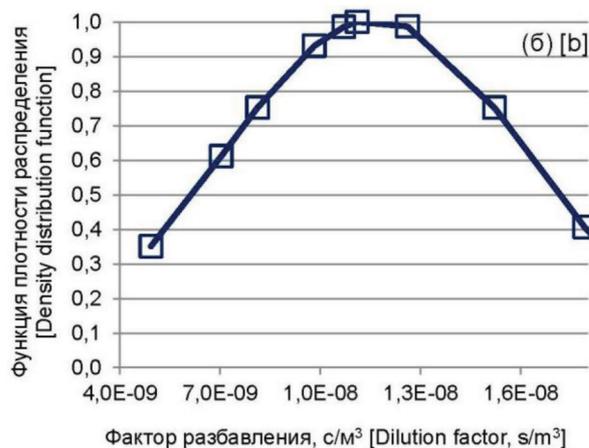
**[Fig. 5.** Absence of correlation between the variability of the annual values of the dilution factor of the  $^{131}\text{I}$  release by NIFHI in the surface layer of the atmosphere calculated by the model and using monitoring data]

ниже выделенной для предприятия части дозовой квоты 300 мкЗв/год [6].

При использовании данного подхода для верификации методики контроля выбросов других ядерно и радиационно опасных объектов необходимо учитывать присутствие техногенных радионуклидов в составе глобального фона, влияние выбросов других предприятий, наличие нескольких источников выбросов организации (их взаимное расположение и высоты).

### Заключение

Результаты определения среднегодовой объемной активности техногенных радионуклидов в приземном воздухе, полученные с использованием данных радиационного мониторинга в районе расположения ядерно и радиаци-



**Рис. 4.** Функция плотности распределения фактора разбавления в 2013–2022 гг.: а – расчет, б – мониторинг. По оси  $x$  – фактор разбавления за каждый год,  $\text{с}/\text{м}^3$ ; по оси  $y$  – функция плотности распределения, нормированная на свое максимальное значение за данный период

**[Fig. 4.** The dilution factor distribution density function in 2013–2022, a – calculation, b – monitoring. On the  $x$ -axis is the dilution factor for each year,  $\text{s}/\text{m}^3$ ; on the  $y$ -axis is the distribution density function normalized to its maximum value for this period]

онно опасных объектов, могут использоваться для контроля источника и верификации расчетной модели переноса примеси через функциональную характеристику – среднегодовой метеорологический фактор разбавления выброса. Фактор разбавления, оцененный по данным штатного контроля источника и мониторинга окружающей среды, не должен превышать расчетное значение, полученное при разработке нормативов предельно допустимых выбросов. Если это условие не выполняется, то методики оценки источника выброса организации и/или расчетные модели переноса примеси требуют пересмотра и верификации, поскольку от корректности оценки источника выброса и среднегодовой объемной активности в приземном воздухе напрямую зависит корректность расчета годовой эффективной дозы облучения населения и норматива предельно допустимого выброса радионуклида.

Показано, что для выброса  $^{131}\text{I}$  АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» в 2013–2022 гг. имеется сильная корреляция среднегодовой объемной активности  $^{131}\text{I}$  в приземном воздухе, полученной с использованием результатов измерений, и данных радиационного контроля годовых выбросов НИФХИ, что подтверждает корректность методики определения выброса  $^{131}\text{I}$ , используемой предприятием.

В течение всего периода времени с 2013 по 2022 г. результаты радиационного мониторинга не превышали расчетные оценки среднегодовой объемной активности  $^{131}\text{I}$  в приземном слое атмосферы в пункте мониторинга в г. Обнинске. Это подтверждает корректность расчетной модели переноса примеси, используемой при установлении нормативов предельно допустимых выбросов НИФХИ. Численные значения факторов разбавления, рассчитанные по модели и с использованием данных мониторинга, соответствуют друг другу (с учетом неопределенности оценки). При этом корреляции их изменчивости не выявлено, что может быть связано с неравномерностью выбросов  $^{131}\text{I}$  НИФХИ в течение года.

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

Крышев А.И. – написание текста статьи, проведение модельных расчетов, представление и обсуждение результатов.

Булгаков В.Г. – разработка метода верификации данных о годовых выбросах радионуклида предприятием в атмосферный воздух на основе результатов радиационного мониторинга окружающей среды.

Каткова М.Н. – организация измерений объемной активности радионуклида.

Полянская О.Н. – описание методики измерений, проведение измерений объемной активности, анализ и интерпретация данных.

Бурякова А.А. – подготовка исходных данных, редактирование статьи и подготовка ее к публикации.

#### Информация о конфликте интересов

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

#### Литература

1. IAEA Safety Standards. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. Safety Guide No. RS-G-1.8. IAEA, Vienna, 2005. 119 p.
2. Vasyanovich M.E., Ekinin A.A., Vasilyev A.V., et al. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 208-209. P. 106006.
3. Агеева Н.В., Ким В.М., Васильева К.И., и др. Многолетние наблюдения за содержанием  $^{131}\text{I}$  в приземном слое атмосферы г. Обнинска Калужской области // Радиация и риск. 2015. Т. 24, № 1. С. 96–107.
4. Masson O., Steinhäuser G., Wershofen H., et al. Potential Source Apportionment and Meteorological Conditions Involved in Airborne  $^{131}\text{I}$  Detections in January/February 2017 in Europe // Environmental Science & Technology. 2018. V. 52. P. 8488-8500. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b01810>.
5. Панченко С.В., Припачкин Д.А., Крышев А.И., Каткова М.Н. Опыт использования моделей рассеяния примеси в городской среде // Атомная энергия. 2020. Т. 128, № 5. С. 282–288.
6. Бурякова А.А., Булгаков В.Г., Крышев А.И., Каткова М.Н. Оценка распространения  $^{131}\text{I}$  в окружающей среде и доз облучения населения Обнинска и его окрестностей от выбросов АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» // Радиация и риск. 2021. Т. 30, № 3. С. 103–111.
7. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 году. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», Росгидромет, 2018. 360 с.
8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», Росгидромет, 2022. 342 с.
9. Крышев А.И., Иванов Е.А. Оценка распределения максимальных значений метеорологического фактора разбавления концентраций радиоактивных выбросов в районах расположения АЭС // Метеорология и гидрология. 2022. Вып. 9. С. 114–122.
10. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников. Москва, Физматлит. 2006. 816 с.

Поступила: 21.03.2023 г.

**Крышев Александр Иванович** – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета. **Адрес для реписки:** 249038, Россия, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4; E-mail: [ecomod@yandex.ru](mailto:ecomod@yandex.ru)  
ORCID ID: 0000-0001-6816-0260

**Булгаков Владимир Георгиевич** – кандидат физико-математических наук, исполняющий обязанности заместителя генерального директора – директора Института проблем мониторинга Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия

**Каткова Маргарита Николаевна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия

**Полянская Ольга Николаевна** – научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия

**Бурякова Анна Александровна** – младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия  
ORCID ID: 0000-0002-4455-9565

Для цитирования: Крышев А.И., Булгаков В.Г., Каткова М.Н., Полянская О.Н., Бурякова А.А. Использование результатов радиационного мониторинга окружающей среды для контроля источника выбросов йода-131 предприятием // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, №2. С. 44-51. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-44-51

## Use of the radiation environmental monitoring results for control of the atmospheric releases of iodine-131 by the facility

Alexander I. Kryshev, Vladimir G. Bulgakov, Margarita N. Katkova, Olga N. Polyanskaya, Anna A. Buryakova

Research and Production Association «Typhoon», Obninsk, Russia

*The analysis was performed, whether the following characteristics correspond with each other: data on the annual release of the radionuclide by the enterprise, the calculation model used for establishing the annual permissible release levels of radionuclides, and the annual average volume activity of the radionuclide, determined using the data of routine radiation monitoring of the surface air. Such analysis was carried out for the release of  $^{131}\text{I}$  from the L. Ya. Karpov Scientific Research Institute of Physics and Chemistry (Obninsk) in 2013–2022. It is shown that for the enterprise release in 2013–2022, the results of environmental radiation monitoring confirm both the data of radiation control of the  $^{131}\text{I}$  release source and the correctness of the radionuclide air transfer calculation model. The average annual meteorological dilution factor of the  $^{131}\text{I}$  for the enterprise release in the surface layer of the atmosphere, estimated from monitoring data, does not exceed the model calculated value. Strong correlation was revealed between the average annual volume activity of  $^{131}\text{I}$  in the surface air, obtained using measurement results, and data on annual air releases of the enterprise. No correlation was found for the variability of the dilution factor estimated by the transfer model and monitoring data. It may be caused by the heterogeneity of the  $^{131}\text{I}$  releases by the enterprise during the year.*

**Key words:** discharge of iodine-131, environmental monitoring, radiation source monitoring, atmospheric transport model, dilution factor.

### Personal contribution of the authors

Kryshev A.I. – writing the text of the paper, conducting model calculations, presenting and discussing the results.

Bulgakov V.G. – development of a method for verifying data on annual radionuclide releases by the enterprise into the atmospheric air based on the results of radiation monitoring of the environment.

Katkova M.N. – organization of measurements of volumetric activity of a radionuclide.

Polyanskaya O.N. – description of measurement methods, measurement of volume activity, analysis and interpretation of data.

Buryakova A.A. – preparation of initial data, editing of the paper and preparing it for publication.

### Conflict of interest

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

### References

1. IAEA Safety Standards. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. Safety Guide No. RS-G-1.8. IAEA, Vienna; 2005. 119 p.
2. Vasyanovich ME, Ekin AA, Vasilyev AV, Kryshev AI, Sazykina TG, Kosykh IV, et al. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;208-209: 106006.
3. Ageeva NV, Kim VM, Vasilyeva KI, Katkova MN, Volokitin AA, Polyanskaya ON. Long-term observations of the content of  $^{131}\text{I}$  in the surface layer of the atmosphere of Obninsk, Kaluga

**Alexander I. Kryshev**

Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet

**Address for correspondence:** Pobedy str., 4, Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia; E-mail: ecomod@yandex.ru

- region. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2015;24(1): 96-107 (In Russian).
4. Masson O, Steinhäuser G, Wershofen H, Mietelski JW, Fischer HW, Pourcelot L, et al. Potential Source Apportionment and Meteorological Conditions Involved in Airborne <sup>131</sup>I Detections in January/February 2017 in Europe. *Environmental Science & Technology*. 2018. Vol. 52. P. 8488-8500. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b01810>.
  5. Panchenko SV, Pripachkin DA, Kryshev AI, Katkova MN. The experience of using impurity scattering models in an urban environment. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2020;128(5): 282-288 (In Russian).
  6. Buryakova AA, Bulgakov VG, Kryshev AI, Katkova MN. Radiiodine, <sup>131</sup>I, release into the atmosphere during normal operation of the radiopharmaceutical production facility at the Karpov Institute of Physical Chemistry: analysis of <sup>131</sup>I concentration in the air and radiation dose to the population of the Obninsk city and its surroundings. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2021;30(3): 103-111. DOI:10.21870/0131-3878-2021-30-3-103-111 (In Russian).
  7. Kryshev AI, Ivanov EA. Estimating the distribution of maximum values of the atmospheric dilution factor for radioactive discharges in the areas of nuclear power plants. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2022;9: 114-122. DOI:10.3103/S1068373922090102 (In Russian).
  8. The radiation situation in Russia and neighboring countries in 2017. Yearbook. Obninsk: RPA «Typhoon», Roshydromet; 2018. 360 p.
  9. The radiation situation in Russia and neighboring countries in 2021. Yearbook. Obninsk: RPA «Typhoon», Roshydromet; 2022. 342 p.
  10. Kobzar AI. Applied mathematical statistics. for engineers and Scientists. Fizmatlit, Moscow; 2006. 816 p. (In Russian).

Received: March 21, 2023

**For correspondence: Alexander I. Kryshev** – Doctor of Biological Sciences, Leading Research Scientist of Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet (Pobedy str., 4, Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia; E-mail: [ecomod@yandex.ru](mailto:ecomod@yandex.ru))

ORCID ID: 0000-0001-6816-0260

**Vladimir G. Bulgakov** – PhD in Physics and Mathematics, Acting Deputy Director General – Director of the Institute of Monitoring Problems of Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet, Obninsk, Russia

**Margarita N. Katkova** – PhD in Biological Sciences, Senior Researcher of Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet, Obninsk, Russia

**Olga N. Polyanskaya** – Researcher of Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet, Obninsk, Russia

**Anna A. Buryakova** – Junior Researcher of Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet, Obninsk, Russia

ORCID ID: 0000-0002-4455-9565

**For citation: Kryshev A.I., Bulgakov V.G., Katkova M.N., Polyanskaya O.N., Buryakova A.A. Use of the radiation environmental monitoring results for control of the atmospheric releases of iodine-131 by the facility. *Radiatsionnaya Gygiena=RadiationHygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 44-51. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-44-51**

## Оценка вторичного радиоактивного загрязнения дезактивированного земельного участка, расположенного на территории зоны отдыха в лесистой местности

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

*В статье приводятся результаты долговременного (1998–2021 гг.) радиологического мониторингового обследования загородной базы отдыха, расположенной в лесистой местности в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС. На территории базы в 1997 г. была проведена локальная механическая дезактивация почвы. Оценку вторичного радиоактивного загрязнения дезактивированной территории проводили путем сравнения динамики радиационной обстановки на обработанной площадке и контрольной, недеактивированной, части базы по 4 основным критериям: 1) мощность дозы гамма-излучения в воздухе от радионуклидов цезия; 2) плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$ ; 3) вертикальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в почве; 4) содержание  $^{137}\text{Cs}$  в растениях и грибах. В 1998 г. значение запаса  $^{137}\text{Cs}$  в верхних 20 см почвы на контрольной части территории базы и дезактивированном участке составило 930 кБк/м<sup>2</sup> и 143 кБк/м<sup>2</sup> соответственно. К 2015 г. значение запаса  $^{137}\text{Cs}$  на контрольной территории и дезактивированной площадке значительно снизилось: на 35% и 36% соответственно. Уменьшение мощности дозы гамма-излучения в воздухе на дезактивированном участке и контрольной территории проходило с одинаковой скоростью, которая в настоящее время в основном определяется распадом  $^{137}\text{Cs}$ . На участке, подвергнутом дезактивации, происходило постепенное самостоятельное восстановление лесной экосистемы. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в биоте (сосна, съедобные грибы) на обработанном участке было многократно ниже такового на контрольной части территории базы отдыха. В целом установлено, что за 24 года после вмешательства не произошло значимого вторичного радиоактивного загрязнения дезактивированного участка.*

**Ключевые слова:** Чернобыльская авария,  $^{137}\text{Cs}$ , почва, лес, дезактивация, долговременная стабильность, вторичное загрязнение.

### Введение

Удаление верхнего слоя почвы является эффективным способом проведения дезактивации территории после аварийного загрязнения окружающей среды долгоживущими радионуклидами [1–3]. Применение данного метода в случае присутствия в выпадениях гамма-излучающих радионуклидов (в частности,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$ ) направлено на существенное (многократное) уменьшение мощности дозы гамма-излучения в воздухе (МД) непосредственно в месте дезактивации и в конечном счете на определенное снижение общей дозы внешнего облучения человека [2–6]. Удаление верхнего 5–10-сантиметрового слоя почвы (с последующим покрытием обработанного участка слоем чистого грунта или песка) как защитное мероприятие особенно эффективно для тех участков, на которых после аварии земля не подвергалась какой-либо обработке, а основная доля выпавших радионуклидов находится именно в этом, верхнем слое. Например, при проведении

широкомасштабной дезактивации населенных пунктов (НП) в Брянской области России в 1989 г. (3 года спустя после Чернобыльской аварии) в качестве объектов воздействия выбирали участки целинной почвы вокруг жилых и общественных зданий, включая школы и детские сады, а также площадки для отдыха и занятий спортом [2]. Для участков, расположенных в лесистой местности (например, загородные базы отдыха), метод оказался эффективным и спустя 9–11 лет после аварии [4, 5, 7, 8].

Как правило, дезактивированные участки находятся в непосредственной близости к радиоактивно загрязненной территории, не подвергшейся дезактивации. Поэтому неизбежно возникает вопрос о вторичном радиоактивном загрязнении очищенных участков [2, 8]. Результаты измерений МД, выполненных спустя год после широкомасштабного дезактивационного вмешательства в Брянской области, не указывали на перенос радионуклидов на дезактивированные участки, расположенные внутри НП

**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

[2]. Наблюдения за дезактивированными участками, расположенными на территории рекреационных зон внутри леса, также не выявили признаков значимого вторичного радиоактивного загрязнения в краткосрочной и среднесрочной перспективе (до 5–7 лет) [9].

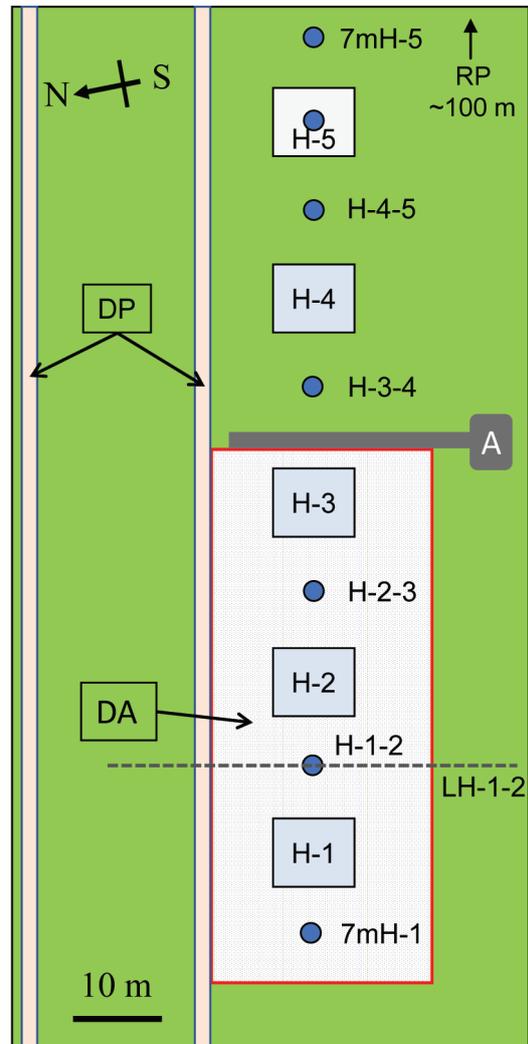
**Цель исследования** – оценка вторичного радиоактивного загрязнения в долгосрочной перспективе (24 года) для дезактивированного земельного участка, расположенного на территории зоны отдыха внутри леса.

**Материалы и методы**

Участок, подвергшийся дезактивации в августе 1997 г. [7, 8, 10], находится на территории бывшей базы отдыха (52,48° с.ш., 31,78° в.д.) вблизи НП Муравинка Злынковского района Брянской области. База «Муравинка» расположена на высоком берегу реки Ипуть внутри массива лесных насаждений. Преобладающими видами деревьев на территории базы являются сосна и береза, встречаются также клен и кустарниковые растения. До августа 1997 г. никаких дезактивационных мероприятий на базе не проводили. Почва по показателю вертикального распределения <sup>137</sup>Cs соответствовала целинной почве, а среднее значение запаса (плотность загрязнения) <sup>137</sup>Cs ( $A_{Cs}$ ) в верхних 20 см составляло  $1250 \pm 360$  кБк/м<sup>2</sup> [7]. На момент проведения дезактивации основными строениями являлись пять двухэтажных щитовых домов размером основания 7,5×10 м<sup>2</sup>, располагавшихся в линию (рис. 1 и 2). Дома были построены в 1970-е гг., т.е. задолго до Чернобыльской аварии. Удаление верхнего 5–10-сантиметрового слоя почвы, который включал в себя лесную подстилку, а также кустарниковых растений и подростов деревьев было выполнено с помощью мини-бульдозера на территории площадью примерно 2000 м<sup>2</sup> (см. рис. 1) [7, 8, 10]. Верхний слой почвы вокруг крупных деревьев был удален с помощью лопат, чтобы по возможности сохранить эти растения жизнеспособными. Дезактивированный участок был отсыпан 7–10-сантиметровым слоем чистого песка, который был извлечен из ям глубиной 2 м, вырытых на территории базы для захоронения отходов, образовавшихся при проведении дезактивации. В результате выполненных работ  $A_{Cs}$  был снижен в 8 раз, а мощность дозы гамма-излучения в воздухе вне помещений – почти в 6 раз [8]. В августе 1998 г. дом № 5 был аккуратно демонтирован и вывезен с территории базы для возведения в другом месте. В 2003 г. остальные 4 дома были также демонтированы и вывезены. Несмотря на демонтаж строений, предназначенных для однодневного или длительного отдыха, территория бывшей базы и по настоящее время продолжает использоваться населением близлежащих и отдаленных НП с рекреационными целями. Однако в связи с отсутствием обычного ухода, включавшего удаление подростов высокорослых растений, территория базы (в том числе и дезактивированный участок) постепенно зарастает кустарниковыми и древесными растениями (см. рис. 2). Отметим, что в настоящее время надежно определить границу дезактивированного участка без применения дозиметра или радиометра невозможно.

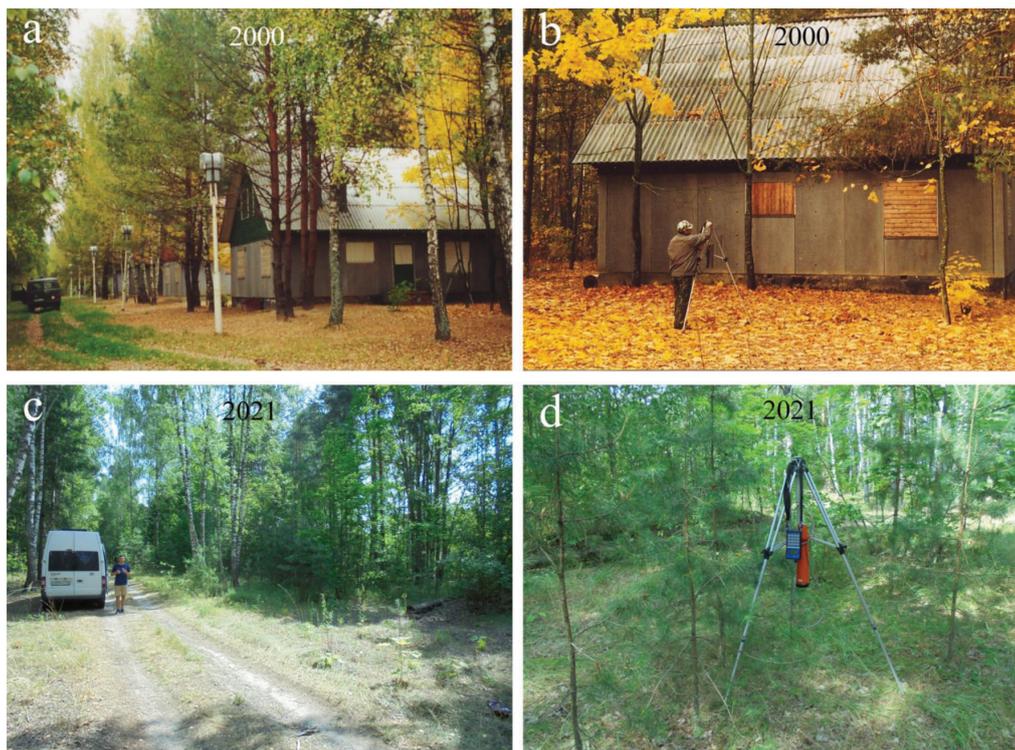
Оценку вторичного радиоактивного загрязнения проводили путем сравнения динамики радиационной обстановки на дезактивированной площадке и недезак-

тивированной территории по 4 основным критериям: 1) мощность дозы гамма-излучения в воздухе от радионуклидов цезия; 2) запас <sup>137</sup>Cs в почве; 3) вертикальное распределение <sup>137</sup>Cs в почве; 4) содержание <sup>137</sup>Cs в растениях и грибах. Ранее эти критерии были использованы для оценки стабильности результатов дезактивационных мероприятий, проведенных на территории загородных баз отдыха «Муравинка» и «Новые Бобовичи» [9].



**Рис. 1.** Карта-схема центральной части базы отдыха «Муравинка» (построено на основе рис. 3.2 из работы [7]). DA – дезактивированная площадка; DP – грунтовые дорожки; RP – референтная точка; А – дорожка, покрытая асфальтом; H-1, H-2, H-3, H-4, H-5 – дома с № 1 по № 5; кругами обозначены точки для выполнения мониторинговых измерений мощности дозы в воздухе; LH-1-2 – линия, вдоль которой были проведены повторные измерения профиля мощности дозы гамма-излучения в воздухе (см. рис. 7)

**[Fig. 1.** Map-scheme of the central part of the Muravinka recreation base (it is constructed based on Fig. 3.2 in the work [7]). DA – decontaminated area; DP – unpaved paths; RP – reference point; A – track covered with asphalt; H-1, H-2, H-3, H-4, H-5 – houses from No. 1 to No. 5; circles indicate points for performing monitoring measurements of the dose rate in air; LH-1-2 is the line along which repeated measurements of the gamma dose rate in air profile were performed (see Fig. 7)]



**Рис. 2.** Центральная часть базы отдыха «Муравинка» в 2000 г. (а и б) и 2021 г. (с и d). Дезактивированная площадка расположена справа от грунтовой дороги (а и с). На б и d показана часть дезактивированного участка, расположенная между домами Н-1 и Н-2  
**[Fig. 2.** The central part of the Muravinka recreation base in 2000 (panels a and b) and 2021 (panels c and d). The decontaminated plot is located to the right of the dirt path (panels a and c). The panels b and d show the part of the decontaminated plot located between houses H-1 and H-2]

Данная серия мониторинговых наблюдений была начата в августе 1998 г. и завершена в августе 2021 г. (табл. 1). Измерения МД и полевых гамма-спектров в воздухе проводили на дезактивированном и недезактивированном участках базы (по 3 точки в каждом случае), а также в центре площадки под домом № 5 (см. рис. 1). Кроме того, примерно в 100 м от базы был найден целинный луговой участок. Этот луг мы использовали в ка-

Таблица 1

**Запас  $^{137}\text{Cs}$  ( $A_{\text{Cs}}$ ) и средняя массовая глубина миграции  $^{137}\text{Cs}$  ( $Z_{\text{Cs-d}}$ , сухой вес;  $Z_{\text{Cs-w}}$ , влажный вес) в верхних 20 сантиметрах почвы, рассчитанная мощность кермы в воздухе от  $^{137}\text{Cs}$  в почве на влажный вес ( $KR_{\text{Cs}}$ ), нормированная  $KR_{\text{Cs}}$  на  $A_{\text{Cs}}$  ( $KR_{\text{Cs-norm}}$ ) и измеренная мощность поглощенной дозы в воздухе от  $^{137}\text{Cs}$  (МПД $_{\text{Cs}}$ ) на обследованных участках в Муравинке**  
 **$^{137}\text{Cs}$  inventory ( $A_{\text{Cs}}$ ) and mean migration mass depth of  $^{137}\text{Cs}$  ( $Z_{\text{Cs-d}}$ , dry weight;  $Z_{\text{Cs-w}}$ , wet weight) in the top 20 cm of soil, calculated kerma rate in air from  $^{137}\text{Cs}$  in soil on wet weight ( $KR_{\text{Cs}}$ ), the normalized  $KR_{\text{Cs}}$  to the  $A_{\text{Cs}}$  ( $KR_{\text{Cs-norm}}$ ), and measured absorbed dose rate in air due to  $^{137}\text{Cs}$  ( $ADR_{\text{Cs}}$ ) at the plots surveyed in Muravinka**

Год [Year]	$A_{\text{Cs}}$ (кБк/м <sup>2</sup> ) [kBq/m <sup>2</sup> ]	$Z_{\text{Cs-d}}$ (г/см <sup>2</sup> ) [g/cm <sup>2</sup> ]	$Z_{\text{Cs-w}}$ (г/см <sup>2</sup> ) [g/cm <sup>2</sup> ]	$KR_{\text{Cs}}$ (нГр/ч) [nGy/h]	$KR_{\text{Cs-norm}}$ (нГр/ч на кБк/ м <sup>2</sup> [nGy/h per kBq/m <sup>2</sup> ])	МПД $_{\text{Cs}}$ (нГр/ч) [ADR $_{\text{Cs}}$ (nGy/h)]	МПД $_{\text{Cs}}$ /KR $_{\text{Cs}}$ [ADR $_{\text{Cs}}$ /KR $_{\text{Cs}}$ ]
Референтная точка [Reference plot]							
1998	900	1,44	1,73	1360	1,51	1270	0,93
2015	673	2,32	2,44	861	1,28	n.m.	n.c.
Недезактивированный участок [Non-treated plot]							
1998	930	2,53	2,83	1140	1,22	975	0,86
2015	604	3,80	4,07	690	1,14	n.m.	n.c.
Дезактивированный участок [Decontaminated plot]							
1998	143	13,4	14,1	59,4	0,42	205	3,45
2015	92	11,2	11,8	44,7	0,49	n.m.	n.c.
Участок Н-5 [The plot H-5]							
1998	2,23	16,8	18,0	0,85	0,38	360	420
2010	15,0	5,82	6,02	12,1	0,86	n.m.	n.c.

n.m. – не измерено; n.c. – не вычислено [n.m. – not measured; n.c. – not calculated].

честве референтной площадки (РП) для сравнительных измерений.

Для периодических дозиметрических измерений в выбранных 8 точках (см. рис. 1; табл. 1) применяли приборы фирмы АТОМТЕХ (Беларусь): EL-1101 (в 1998–2001 гг.), EL-1117 (в 2002–2008 гг.), ДКС-АТ1121 (в 2009–2012 гг.) и МКС-АТ6101Д (в 2015–2021 гг.). С помощью дозиметров EL-1101 и EL-1117 измеряли мощность экспозиционной дозы (МЭД, мкР/ч). Для перехода от показателя МЭД к показателю мощности поглощенной дозы (МПД, нГр/ч) использовали коэффициент преобразования, равный 8,7 нГр/мкР [11]. С помощью ДКС-АТ1121 и МКС-АТ6101Д измеряли мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД, нЗв/ч). Наряду с периодическими измерениями МД в 3 мониторинговых точках (7мН-1, Н-1-2, Н-2-3), расположенных в глубине дезактивированного участка, в 2000 и 2015 гг. было выполнено измерение профиля МД вдоль линии ЛН-1-2 (см. рис. 1). Целью этих измерений было изучение возможного краевого переноса радионуклидов с загрязненной территории на дезактивированный участок [9]. Измерения выполняли с шагом 1 м на высоте 1 м. Измерения полевых гамма-спектров проводили с помощью портативных сцинтилляционных гамма-спектрометров СКИФ (СИНКО, Россия) (в 1998–2008 гг.) и МКС-АТ6101Д (в 2015–2021 гг.). Для всех приборов был определен собственный фон устройства и его отклик на космическое излучение [11–13].

Измерения на всех участках выполняли в один и тот же день в сухую погоду в весенне-летний период. Детекторы дозиметров и спектрометров размещали на алюминиевом треножнике на высоте 1 м от поверхности почвы (см. рис. 2 б и d). Обработку полученной дозиметрической и спектрометрической информации проводили по методам, изложенным в работах [11–14]. Выходными параметрами были: МПД от радионуклидов Cs (МПД<sub>Cs</sub>, нГр/ч), МПД от первичных (нерассеянных) фотонов с энергией 662 кэВ (МПД<sub>662</sub>, нГр/ч), МПД от природных радионуклидов (МПД<sub>ПРН</sub>, нГр/ч), МАЭД от радионуклидов Cs (МАЭД<sub>Cs</sub>, нЗв/ч), МАЭД от первичных фотонов с энергией 662 кэВ (МАЭД<sub>662</sub>, нЗв/ч), МАЭД от природных радионуклидов (МАЭД<sub>ПРН</sub>, нЗв/ч). Вклад (%) рассеянных фотонов в общую мощность дозы от <sup>137</sup>Cs был вычислен на основе разницы между МПД<sub>Cs</sub> и МПД<sub>662</sub> (в 1998–2008 гг.), МАЭД<sub>Cs</sub> и МАЭД<sub>662</sub> (в 2015, 2020 и 2021 гг.). Предполагалось, что МД от природных радионуклидов не менялась в период наблюдений. Для перехода от МАЭД<sub>ПРН</sub> (нЗв/ч) к МПД от природных радионуклидов (МПД<sub>ПРН</sub>, нГр/ч) использовали коэффициент, равный 0,8 Гр/Зв [12].

Для уменьшения неопределенностей, связанных с использованием разных дозиметров в разные годы, мы использовали отношение МД от радионуклидов Cs (МД<sub>Cs</sub>) в выбранной локации (точке) к МД<sub>Cs</sub> в референтной локации, т.е. на целинном лугу, на тот год, когда проводили измерения. Эта безразмерная величина ниже обозначена как «относительная мощность дозы (ОМД<sub>Cs</sub>)». По сути ОМД<sub>Cs</sub> соответствует понятию «фактор места (location factor)» [15], используемому при оценке дозы внешнего облучения от чернобыльского компонента гамма-излучения.

Взятие проб почвы на дезактивированной и недезактивированной части территории базы, а также на референтной площадке проводили в 1998 и 2015 гг. с помощью разборного стального цилиндрического пробоотборника

ка длиной 20 см и внутренним диаметром 5 см (рис. 3). В каждом случае было отобрано по 7 кернов (по 2 вблизи точек 7мН-1, Н-2-3, Н-3-4, 7мН-5, и по 3 рядом с точками Н-1-2 и Н-4-5). Для изучения вертикального распределения <sup>137</sup>Cs в почве керны делили на слои толщиной 2 или 5 см. Такой же пробоотборник был использован в 1998 и 2010 гг. для взятия проб почвы на площадке дома № 5. В каждом году здесь было взято по 5 кернов, которые делили на слои толщиной 5 см. Соответствующие слои от кернов с площадки объединяли в одну пробу, за исключением дезактивированной площадки, где в 2015 г. для измерений были взяты слои от каждого отобранного керна. Масса пробы была определена сразу после отбора (влажный вес) и после просушки до достижения постоянного веса (сухой вес).



**Рис. 3.** Керны почвы, отобранные в 2015 г. на базе «Муравинка» на недезактивированной территории (а) и дезактивированной площадке (б). Длина кернов равна примерно 20 см. Стрелкой показана граница между слоем насыпанного песка и материнской почвой

**[Fig. 3.]** Soil cores sampled in 2015 at the Muravinka recreation base in the untreated territory (a) and decontaminated plot (b). The length of the cores is approximately equal to 20 cm. The arrow indicates the boundary between the layer of poured sand and the parent soil

Отбор проб игл молодых сосен (по 7 деревьев в возрасте 5–7 лет на дезактивированной и недезактивированной частях территории базы) был проведен в 2015 г., а проб съедобных грибов (по 3–5 плодовых тел подберезовиков и сыроежек) – в 2016 г. Пробы биоты были высушены до достижения постоянного веса.

Измерения активности <sup>137</sup>Cs в пробах были выполнены с использованием гамма-спектрометров с полупроводниковыми детекторами, имевшими соответствующую калибровку по эффективности регистрации фотонов с энергией 661,6 кэВ для разных геометрий и плотностей счетного образца [16]. Статистическая неопределенность оценки площади пика полного поглощения с энергией 661,6 кэВ не превышала 10% (95% вероятность).

Полученное значение активности пересчитывали на момент отбора пробы с учетом радиоактивного распада  $^{137}\text{Cs}$  (30,1 года). Выходными параметрами лабораторных исследований были: удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в пробе (УА, Бк/кг); запас  $^{137}\text{Cs}$  в 20-сантиметровом слое почвы ( $A_{\text{Cs}}$ , кБк/м<sup>2</sup>); средняя глубина миграции  $^{137}\text{Cs}$  в почве ( $Z_{\text{Cs}}$ , г/см<sup>2</sup>) [17].

Вычисление мощности воздушной кермы от  $^{137}\text{Cs}$  ( $KR_{\text{Cs}}$ , нГр/ч), находящегося в почве, проводили по методу Golikov et al. [18, 19]. Результаты вычисления  $KR_{\text{Cs}}$  приведены на влажный вес почвы.

Агрегированный коэффициент перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в биоту ( $T_{\text{ag}}$ , м<sup>2</sup>/кг) рассчитывали как отношение УА радионуклида в биоте к его запасу ( $A_{\text{Cs}}$ ) в почве [20].

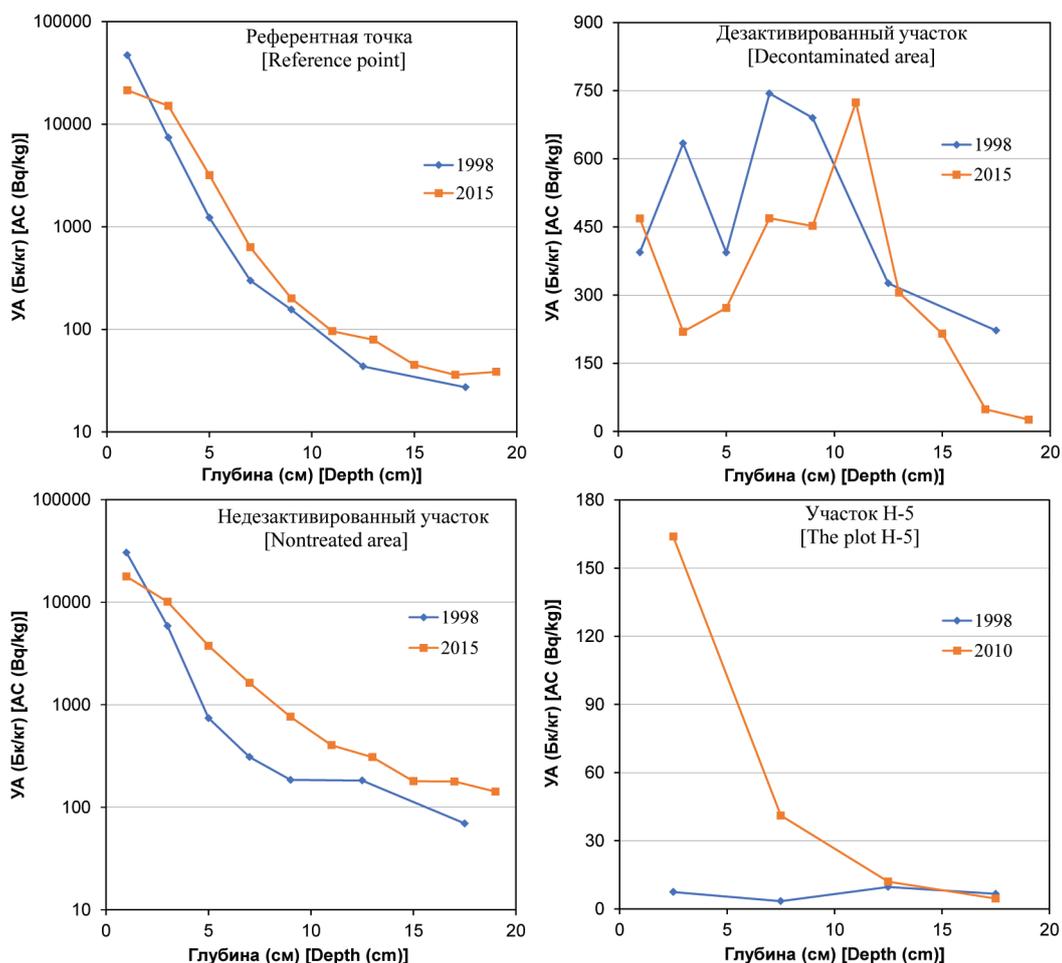
## Результаты и обсуждение

### $^{137}\text{Cs}$ в почве и биоте

Величина УА  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы находилась в диапазоне от  $3,40 \pm 0,51$  Бк/кг до  $47100 \pm 5600$  Бк/кг (сухой вес). Значения  $A_{\text{Cs}}$  на референтном участке (900 кБк/м<sup>2</sup>) и недезаktivированной территории базы (930 кБк/м<sup>2</sup>)

в 1998 г. практически совпадали друг с другом. Значение  $A_{\text{Cs}}$  на дезактивированном участке было в 6,5 раза меньше (см. табл. 1). К 2015 г. значение  $A_{\text{Cs}}$  на референтном участке, недезаktivированной и дезактивированной территории базы значительно снизилось: на 25, 35 и 36% соответственно. Уменьшение величины  $A_{\text{Cs}}$  произошло в основном за счет радиоактивного распада  $^{137}\text{Cs}$  (32% за 17 лет). УА  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем 2-сантиметровом слое на референтном участке и недезаktivированной территории уменьшилась за это время более существенно: в 2,2 раза и 1,7 раза соответственно. Это в определенной мере связано с вертикальной миграцией радионуклида: средняя глубина миграции  $^{137}\text{Cs}$  ( $Z_{\text{Cs}}$ ) на этих участках увеличилась (см. табл. 1). Однако, в целом, принципиальных изменений в форме распределения УА  $^{137}\text{Cs}$  по вертикали в почве на референтном участке и недезаktivированной территории с 1998 г. до 2015 г. не произошло (рис. 4).

На дезактивированном участке  $Z_{\text{Cs}}$  несколько уменьшилась (см. табл. 1), а УА  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем 2-сантиметровом слое увеличилась примерно в 1,2 раза (см. рис. 4). Теоретически такая динамика на дезактивированном



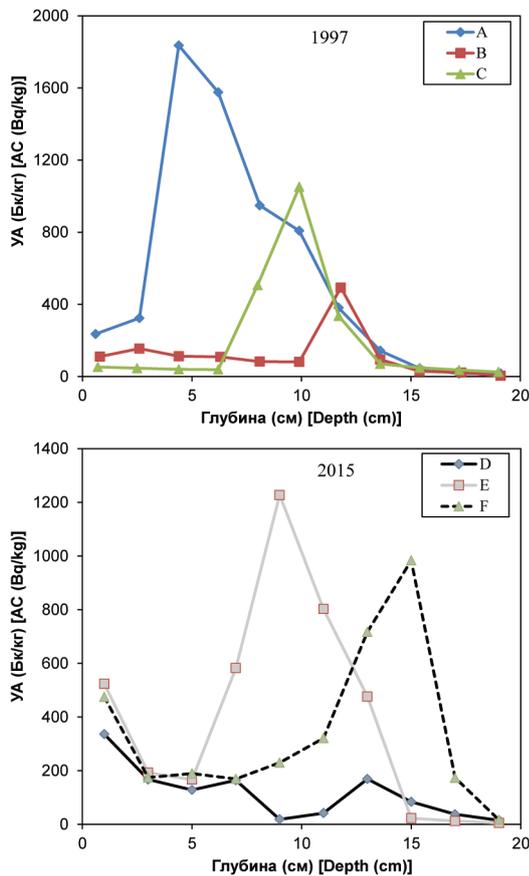
**Рис. 4.** Вертикальное распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (УА, на сухой вес) в почве недезаktivированного участка, дезактивированного участка, места дома Н-5 на базе «Муравинка» и референтной площадки в 1998 и 2015 гг. Представлено суммарное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в 7 кернах почвы, за исключением участка Н-5, где дано суммарное распределение для 5 кернов [Fig. 4. Vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  activity concentration (AC, dry weight) in the soil of the non-decontaminated area, decontaminated area, place of the H-5 house at the Muravinka recreation base, and the reference point in 1998 and 2015. The total distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in seven soil cores is shown, except for the plot H-5, where the total distribution for five cores is provided]

участке могла быть связана с механическим нарушением верхнего «чистого» слоя песка и перемещением части остаточной активности  $^{137}\text{Cs}$  с материнской почвой наверх. Однако визуально в индивидуальных ядрах можно было различить четкое деление на слой песка и постеляющую материнскую почву. Снимок одного из ядер приведен на рисунке 3. Там же для сравнения приведен вид ядра, отобранного на контрольной части территории базы. На рисунке 5 показано, что пик УА  $^{137}\text{Cs}$  в отдельно взятых ядрах с дезактивированной площадки в 2015 г. (так же, как и сразу после дезактивации в 1997 г.) находился на некоторой глубине, которая варьировала от ядра к ядру. Сопоставление результатов визуального обследования ядер и радиометрических измерений показало, что положение пика хорошо соответствовало границе между песком и почвой и зависело от толщины слоя песка в месте отбора ядра [8, 9]. Толщина песка находилась в диапазоне 4–15 см. Поэтому увеличение УА  $^{137}\text{Cs}$  в самом верхнем 2-сантиметровом слое к 2015 г. в какой-то мере можно связать с переносом радионуклида с глубины на поверхность травами [9] и древесными

растениями, в частности, молодыми соснами, в иглах которых содержание радионуклида находилось на уровне 20–30 Бк/кг (табл. 2). Перенос радионуклидов на поверхность мог осуществляться грибами, образующими микоризу с древесными растениями, – сыроежками и подберезовиками, в плодовых телах которых также был определен  $^{137}\text{Cs}$  (см. табл. 2). Еще одним механизмом загрязнения верхнего слоя почвы на дезактивированном участке может быть перенос радионуклидов по поверхности с соседней загрязненной территории (вторичное загрязнение). В пользу существования такого механизма однозначно свидетельствуют результаты изучения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве на площадке дома Н-5. На этой площадке сразу после демонтажа самого дома в 1998 г.  $A_{\text{Cs}}$  был очень низким – 2,2 кБк/м<sup>2</sup>, что разумно соответствовало остаточной плотности глобальных выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в Брянской области [11]. К 2015 г.  $A_{\text{Cs}}$  на площадке дома Н-5 увеличилась многократно: до 15 кБк/м<sup>2</sup> (см. табл. 1). Многократно увеличилась и УА  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем 0–10-сантиметровом слое почвы (см. рис. 4), а  $Z_{\text{Cs}}$  существенно уменьшилась (см. табл. 1). Отметим, что признаки вторичного загрязнения оказались столь заметными в связи с чрезвычайно низкими исходными значениями  $A_{\text{Cs}}$  и УА  $^{137}\text{Cs}$ , а также благодаря сравнительно небольшой площади (75 м<sup>2</sup>) этой «чистой» площадки, находящейся внутри сильно загрязненного окружения. В среднем скорость вторичного загрязнения площадки Н-5 в период 1998–2010 гг. можно оценить величиной, равной примерно 1,3 кБк/м<sup>2</sup> в год, что составляет менее 0,2% значения  $A_{\text{Cs}}$  на дезактивированной территории базы. В качестве основного носителя этого сравнительно малозначимого загрязнения следует рассматривать опад с деревьев, окружающих дезактивированный участок и площадку Н-5, а также органический и неорганический материал, переносимый ветром, автотранспортом и людьми с радиоактивно загрязненной поверхности остальной территории базы. Значения УА  $^{137}\text{Cs}$  в иглах сосны и плодовых телах грибов в этой части базы были в 10–260 раз выше, по сравнению с таковыми на дезактивированной площадке (см. табл. 2). Эти различия были связаны как с различиями между площадками по показателю  $A_{\text{Cs}}$ , так и с различиями в интенсивности поступления  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в биоту. На дезактивированной площадке, по сравнению с контрольной территорией, значения  $T_{\text{ag}}$  были в большинстве случаев ниже (см. табл. 2). УА  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем (в основном органическом) слое почвы толщиной 2 см на дезактивированной части базы в 2015 г. составила  $17\,800 \pm 2100$  Бк/кг, что было в 36 раз больше, чем значение УА  $^{137}\text{Cs}$  ( $469 \pm 56$  Бк/кг) в соответствующем слое почвы с дезактивированной площадки.

*Мощность дозы гамма-излучения в воздухе*

По данным измерений 2015, 2020 и 2021 гг., выполненных с использованием полевого спектрометра МКС-АТ6101Д, значения МАЭД<sub>ПРН</sub> на территории базы и референтной площадке варьировали в очень узком диапазоне: от 16 до 23 нЗв/ч. Переведенные в МПД<sub>ПРН</sub> и усредненные по точкам наблюдений значения МД от природных радионуклидов даны в таблице 3. Как видно из данных, представленных в таблице 3, значения МПД<sub>ПРН</sub> на отдельных точках хорошо соответствовали друг другу. Отсутствие различий между точками по показателю МД от природных радионуклидов иллюстрируется практически полным со-



**Рис. 5.** Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (УА, на сухой вес) по вертикали в индивидуальных ядрах почвы, отобранных на дезактивированном участке базы «Муравинка» в 1997 г. (А, В, С по данным [7]) и 2015 г. (D, E, F, данное исследование)  
**[Fig. 5.** Vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  activity concentration (AC, dry weight) in individual soil cores sampled at the decontaminated site of the Muravinka recreation base in 1997 (A, B, C according to [7]) and 2015 (D, E, F, this study)]

Таблица 2

Удельная активность <sup>137</sup>Cs (на сухой вес) в пробах игл молодых сосен и плодовых тел съедобных грибов, отобранных на дезактивированном участке (AC-d) и недеактивированном участке (AC-n) на базе отдыха «Муравинка», и агрегированные коэффициенты перехода <sup>137</sup>Cs в паре почва – биота на дезактивированном участке (Tag-d) и недеактивированном участке (Tag-n)

[Table 2

Activity concentration of <sup>137</sup>Cs (dry weight) in samples of needles of young pines and fruiting bodies of edible mushrooms collected at the decontaminated plot (AC-d) and untreated plot (AC-n) in the recreation base Muravinka, and <sup>137</sup>Cs aggregated transfer coefficients in the soil-biota pair at the decontaminated plot (Tag-d) and untreated plot (Tag-n)]

Проба [Sample]	AC-n (Бк/кг [Bq/kg])	AC-d (Бк/кг [Bq/kg])	AC-n/AC-d	Tag-n (м <sup>2</sup> /кг, n 10 <sup>3</sup> [m <sup>2</sup> /kg, n 10 <sup>3</sup> ])	Tag-d (м <sup>2</sup> /кг, n 10 <sup>3</sup> [m <sup>2</sup> /kg, n 10 <sup>3</sup> ])	Tag-n/Tag-d
21.08.2015						
Сосна, иглы 1-го года [Pine, 1-y needles]	1850±220	29,4±4,4	63	3,1	0,32	10
Сосна, иглы 2-го года [Pine, 2-y needles]	622±75	19,1±2,9	33	1,0	0,21	5,0
04.08.2016						
Грибы сыроежки ( <i>Russula</i> sp.) [Mushrooms ( <i>Russula</i> sp.)]	67400±8100	256±31	263	114	2,8	40
Грибы подберезовики ( <i>Leccinum</i> sp.) [Mushrooms ( <i>Leccinum</i> sp.)]	21700±2600	2140±260	10	37	24	1,5

впадением амплитуд измеренных гамма-спектров в диапазоне энергий 1000–3000 кэВ (рис. 6). Значения МПД<sub>ПРН</sub>, определенные в 2015–2021 гг., вполне соответствовали среднему значению этого показателя (18±3 нГр/ч), выведенному в 1997–2002 гг. [9] для территории базы «Муравинка».

Таблица 3

Мощность поглощенной дозы в воздухе от <sup>137</sup>Cs (МПД<sub>CS</sub>) в 1998 г. и средняя мощность поглощенной дозы в воздухе от природных радионуклидов (МПД<sub>ПРН</sub>) в точках измерений в Муравинке (см. рис. 1)

[Table 3

Absorbed dose rate in air from <sup>137</sup>Cs (ADR<sub>CS</sub>) in 1998 and average absorbed dose rate in air from natural radionuclides (ADR<sub>NRN</sub>) at the measurement points in Muravinka (Fig. 1)]

Точка (Point)	МПД <sub>CS</sub> (нГр/ч)* [ADR <sub>CS</sub> (nGy/h)]*	МПД <sub>ПРН</sub> (нГр/ч)** [ADR <sub>NRN</sub> (nGy/h)]**
RP	1270±40	17±3
7mH-5	1060±40	17±2
H-4-5	950±29	17±3
H-3-4	918±28	15±2
H-2-3	230±11	18±2
H-1-2	182±10	17±2
7mH-1	203±10	16±2
H-5	360±12	18±2

\* – статистическая неопределенность измерения приведена для вероятности 95% [\* – statistical measurement uncertainty is given for the probability of 95%].

\*\* – средняя±стандартное отклонение для 3 измерений

[\*\* – mean±standard deviation for three measurements].

В 1998 г. максимальная величина МПД<sub>CS</sub> была зарегистрирована на референтной целинной площадке, а мини-

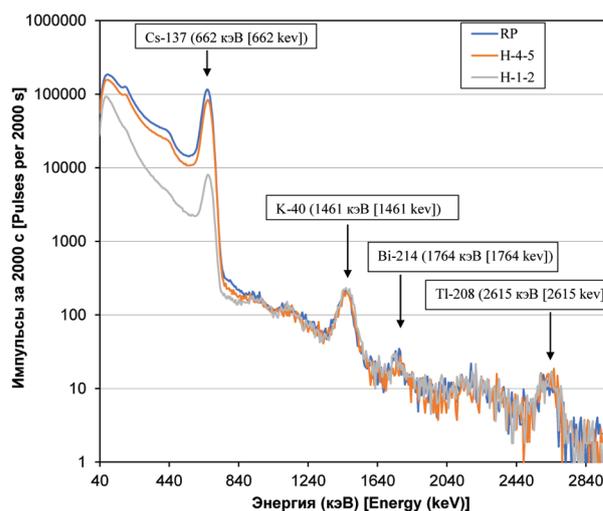


Рис. 6. Гамма-спектры, измеренные in situ на референтной площадке (RP), недеактивированной территории (точка H-4-5) и дезактивированном участке (точка H-1-2) базы «Муравинка» в августе 2015 г.

[Fig. 6. Gamma spectra measured in situ at the reference point (RP), non-decontaminated territory (point H-4-5) and decontaminated plot (point H-1-2) of the Muravinka recreation base in August 2015]

мальная – в центре дезактивированной площадки в точке H-1-2 (см. табл. 3). Значения МПД<sub>CS</sub> в 11–76 раз превышали значения МПД<sub>ПРН</sub>.

В промежутке между 1998 г. и 2008 г. МД<sub>CS</sub> на референтной площадке (МД-реф) снижалась (табл. 4) с эффективным периодом полууменьшения (T<sub>эф</sub> [21]), равным 16 годам. В период 2015–2021 гг. величина данного показателя была намного больше: 30 лет; т.е. скорость уменьшения мощности дозы в воздухе от <sup>137</sup>Cs снизилась и совпала со скоростью распада <sup>137</sup>Cs.

Таблица 4

Мощность дозы гамма-излучения в воздухе в референтной точке (МД-реф) и отношение мощности дозы в других обследованных точках к МД-реф (ОМД<sub>с</sub>) в Муравинке. Чернобыльский компонент дозы гамма-излучения

[Table 4

Dose rate of gamma radiation in the air at the reference point (DR-ref) and the ratio of dose rate at other surveyed points to DR-ref (RDR<sub>с</sub>) in Muravinka. The Chernobyl's component of gamma dose]

Год [Year]	Дозиметр [Dosimeter]	МД-реф* [DR-ref*]	ОМД <sub>с</sub> для точки (безразмерная величина) [RDR <sub>с</sub> for the point (dimensionless value)]						
			7mH-5	H-4-5	H-3-4	H-2-3	H-1-2	7mH-1	H-5
1998	EL-1101	1270	0,83	0,75	0,72	0,18	0,14	0,16	0,28
1999	EL-1101	1220	0,84	0,76	0,71	0,18	0,14	0,16	0,31
2000	EL-1101	1150	0,84	0,73	0,70	0,18	0,14	0,16	0,29
2001	EL-1101	1130	0,83	0,71	0,68	0,18	0,14	0,16	0,29
2002	EL-1117	1090	0,80	0,71	0,67	0,17	0,13	0,14	0,27
2003	EL-1117	1080	0,81	0,74	0,68	0,19	0,14	0,16	0,32
2004	EL-1117	1010	0,83	0,75	0,69	0,20	0,14	0,15	0,31
2005	EL-1117	969	0,81	0,70	0,68	0,17	0,15	0,16	0,29
2006	EL-1117	877	0,82	0,74	0,69	0,19	0,16	0,17	0,29
2007	EL-1117	837	0,81	0,75	0,68	0,18	0,16	0,17	0,32
2008	EL-1117	825	0,82	0,73	0,67	0,19	0,16	0,18	0,31
2009	AT1121	986	0,80	0,75	n.d.	0,18	0,17	0,19	0,31
2012	AT1121	868	0,75	0,71	0,65	0,19	0,14	0,16	0,28
2015	AT6101Д	1000	0,83	0,77	0,70	0,18	0,17	0,18	0,29
2016	AT6101Д	944	0,84	0,76	0,70	0,19	0,16	0,19	0,26
2020	AT6101Д	889	0,83	0,77	0,70	0,18	0,15	0,16	n.d.
2021	AT6101Д	853	0,87	0,79	0,71	0,19	0,16	0,17	0,28
	Медиана [Median]		0,83	0,75	0,69	0,18	0,15	0,16	0,29
	Средняя [Mean]		0,82	0,74	0,69	0,18	0,15	0,16	0,29
	С.о. [S.d.]		0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
	KB (%) [CV (%)]		2,4	4,1	2,9	5,6	6,7	6,3	6,1

\* – МПД<sub>с</sub> (нГр/ч) в 1998–2008 гг. и МАЭД<sub>с</sub> (нЗв/ч) в 2009–2021 гг. [\* – ADR<sub>с</sub> (nGy/h) in 1998–2008 and ADER<sub>с</sub> (nSv/h) in 2009–2021]; статистическая неопределенность измерения МД-реф не превышала 5% (95% вероятность) [statistical uncertainty of DR-ref measurement did not exceed 5% (95% probability)]; С.о. – стандартное отклонение [S.d. – standard deviation]; KB – коэффициент вариации [CV – coefficient of variation].

В 1998 г. величина относительной мощности дозы (ОМД<sub>с</sub>) находилась в диапазоне 0,72–0,83 на дезактивированной территории базы и в диапазоне 0,14–0,18 на дезактивированном участке (см. табл. 4). На площадке дома № 5 значение ОМД<sub>с</sub> (0,28) заметно превышало таковые на дезактивированном участке. Значения ОМД<sub>с</sub> для каждой отдельно взятой точки наблюдений на базе незначительно изменялись год от года: коэффициент вариации находился в диапазоне от 2,4% до 6,7%. Вместе с тем, для точек 7mH-1, H-1-2 и H-2-3 величина ОМД<sub>с</sub> демонстрировала слабую положительную зависимость от времени. Для точек 7mH-1 и H-1-2 данная зависимость была статистически значимой (тест Спирмана, P < 0,05). Это могло указывать на несколько замедленную динамику МД<sub>с</sub> на дезактивированном участке по сравнению с таковой на референтной площадке.

Значение мощности воздушной кермы от <sup>137</sup>Cs (KR<sub>с</sub>), вычисленное на основе результатов определения активности <sup>137</sup>Cs в нативных (влажных) пробах почвы (см. табл. 1) для референтной площадки и дезактивированной территории, оказалось, соответственно, на 7% и 14%

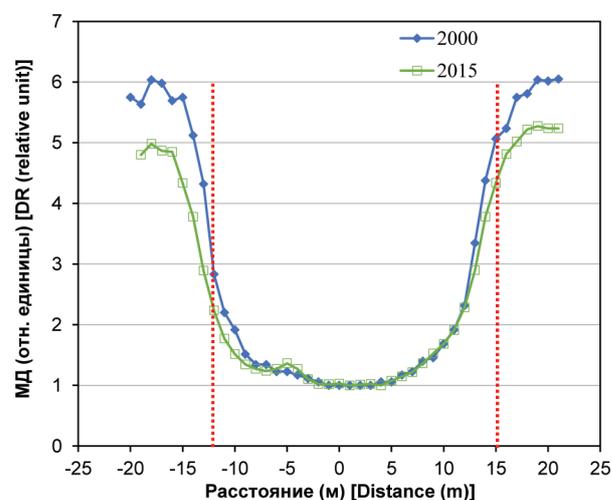
больше значения МПД<sub>с</sub>, непосредственно измеренной *in situ* в 1998 г. Такие различия являются ожидаемыми, т.к. KR<sub>с</sub> была вычислена по модели для бесконечного плоского источника излучения [18, 19], а в действительности поверхность земли обладает неровностями; кроме того, над землей присутствует растительность, выступающая в роли ослабителя гамма-излучения. На дезактивированной территории базы такими дополнительными ослабителями являлись строения. На дезактивированной площадке KR<sub>с</sub> была, напротив, кратно меньше МПД<sub>с</sub> (см. табл. 1). Это соотношение можно объяснить ограниченными размерами очищенной площадки, находящейся внутри радиоактивно загрязненной территории. В этом случае величина МПД<sub>с</sub> на площадке в значительной мере зависит от интенсивности гамма-излучения, исходящего от окружающей дезактивированной территории. Этот вклад в МПД<sub>с</sub> в особенности велик для случая площадки H-5, которая имела малые размеры и пренебрежимо малый уровень загрязнения почвы <sup>137</sup>Cs (см. табл. 1).

Различия между разными точками наблюдений касались не только МД<sub>с</sub>, но и спектрального состава гамма-

поля. В 1998–2008 гг. на референтной площадке и неде-зактивированной территории более половины  $M_{D_{Cs}}$  было обусловлено нерассеянными (первичными) гамма-квантами с энергией 662 кэВ, а вклад рассеянных фотонов был, соответственно, меньше 50% (табл. 5). На площадке Н-5 и дезактивированной площадке вклад от рассеянных фотонов доминировал в  $M_{D_{Cs}}$ . Для периода 2015–2021 гг. вклад от рассеянных фотонов в  $M_{D_{Cs}}$  был больше такового для периода 1998–2008 гг. (см. табл. 5). Для всех точек наблюдения эти различия были статистически значимы (U-тест Манна – Уитни,  $P < 0,05$ ). Увеличение вклада от рассеянных фотонов связано как с заглублением источника излучения в почве [22], так и с использованием разных операционных величин для представления  $M_{D}$  в воздухе в разные годы наблюдений: МПД в 1998–2008 гг. и МАЭД в 2015–2021 гг. В диапазоне 60–800 кэВ отношение МАЭД к МПД увеличивается с уменьшением энергии фотонов [12, 23]. Однако принципиальных изменений в различиях по спектральному составу гамма-излучения между точками наблюдений в зависимости от времени мы не наблюдаем: на дезактивированной площадке и площадке Н-5, по сравнению с остальными площадками, в  $M_{D_{Cs}}$  в период 2015–2021 гг. отчетливо преобладает вклад от рассеянных фотонов с энергией менее 662 кэВ.

Отсутствие признаков значимого вторичного радиоактивного загрязнения дезактивированной площадки, определяемого по динамике  $M_{D_{Cs}}$  в 3 точках регулярного мониторинга, подтверждается сравнением профилей  $M_{D_{Cs}}$ , которые были измерены вдоль линии LH-1-2 (см. рис. 1) в 2000 и 2015 гг. Как видно из данных, представленных на рисунке 7, формы профилей в целом удовлетворительно совпадают друг с другом. Некоторое уменьшение различий между центральным сегментом и перифери-

ей связано с использованием разных дозиметрических величин – МПД в 2000 г. и МАЭД в 2015 г., соотношение между которыми меняется, как указано выше, в зависимости от энергии гамма-излучения.



**Рис. 7.** Профили относительной мощности дозы гамма-излучения от  $^{137}\text{Cs}$  ( $M_{D}$ ) вдоль линии LH-1-2, пересекающей дезактивированный участок между домами Н-1 и Н-2 (см. рис. 1). Значение МПД $_{Cs}$  (в 2000 г.) и МАЭД $_{Cs}$  (в 2015 г.) в точке Н-1-2 (0 м) принято равным 1. Границы дезактивированного участка обозначены красными пунктирными линиями  
**[Fig. 7.** Profiles of relative dose rate of gamma radiation from  $^{137}\text{Cs}$  (DR) along the LH-1-2 line crossing the decontaminated plot between houses H-1 and H-2 (Fig. 1). The value of ADR $_{Cs}$  (in 2000) and ADER $_{Cs}$  (in 2015) at the point H-1-2 (0 m) is taken equal to 1. Boundaries of the decontaminated plot are indicated by red dotted lines]

**Вклад рассеянных фотонов в  $M_{D_{Cs}}$  в точках периодических измерений в Муравинке**

Table 5

**Input of scattered photons to DR $_{Cs}$  at the points of periodical measurements in Muravinka**

[Table 5

Параметр [Parameter]	Вклад* для точки (%) [Input* for the point (%)]							
	RP	7mH-5	H-4-5	H-3-4	H-2-3	H-1-2	7mH-1	H-5
1998–2008 гг. [1998–2008]								
Minimum	30,1	32,0	36,7	34,2	64,3	68,9	68,1	52,8
Maximum	34,6	40,8	44,4	43,8	73,3	79,7	77,4	62,8
Median	31,5	36,7	41,5	39,4	66,0	71,3	71,0	56,3
Mean	32,0	36,7	41,2	39,4	67,4	73,2	71,5	56,7
C.o. [S.d.]	0,6	0,9	1,2	1,4	6,6	9,5	5,9	3,5
KB (%) [CV (%)]	2,0	2,5	2,9	3,6	9,8	13	8,3	6,1
2015–2021 гг. [2015–2021]								
Minimum	43,5	47,9	52,2	51,9	75,2	78,5	76,4	68,2
Maximum	44,8	49,7	52,6	52,8	76,2	81,0	79,9	73,7
Median	44,4	48,7	52,2	51,9	75,3	79,3	77,7	70,9
Mean	44,1	48,7	52,4	52,2	75,6	79,6	78,1	71,1
C.o. [S.d.]	0,5	1,0	0,3	0,5	1,7	5,0	6,3	6,8
KB (%) [CV (%)]	1,1	2,1	0,5	1,0	2,2	6,3	8,1	9,5

\* – вклад рассеянных фотонов для поглощенной дозы в 1998–2008 гг. и AMBIENTНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ в 2015–2021 гг. [\* – input of scattered photons to absorbed dose in 1998–2008 and ambient dose equivalent in 2015–2021].

### Заключение

Выполненное долговременное радиологическое мониторинговое обследование загородной базы отдыха, на которой была проведена локальная механическая дезактивация, показало, что за 24 года после вмешательства не произошло значимого вторичного радиоактивного загрязнения дезактивированного земельного участка. В 1998 г. значение запаса  $^{137}\text{Cs}$  в верхних 20 см почвы на контрольной части территории базы и дезактивированном участке составило, 930 кБк/м<sup>2</sup> и 143 кБк/м<sup>2</sup> соответственно. К 2015 г. значение запаса  $^{137}\text{Cs}$  на контрольной территории и дезактивированной площадке значительно снизилось: на 35% и 36% соответственно. Уменьшение мощности дозы гамма-излучения в воздухе на дезактивированном участке и контрольной недезактивированной территории проходило с одинаковой скоростью, которая в настоящее время в основном определяется распадом  $^{137}\text{Cs}$ . На участке, подвергнутом дезактивации, происходило самостоятельное восстановление нарушенной лесной экосистемы. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в биоте (сосна, съедобные грибы) на этом участке было многократно ниже такового на контрольной части территории базы отдыха. Исползованная технология дезактивации радиоактивно загрязненной территории (удаление верхнего 5–10-сантиметрового слоя почвы с последующим покрытием обработанного участка слоем чистого грунта или песка) может быть рекомендована для достижения высокоустойчивого долговременного эффекта в отношении уменьшения мощности дозы гамма-излучения на радиоактивно загрязненных земельных участках, расположенных в лесистой местности.

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

Рамзаев В.П. – концепция, измерения, написание рукописи.

Барковский А.Н. – концепция, редактирование рукописи.

### Благодарности

Авторы благодарят младшего научного сотрудника К.В. Варфоломееву (ФБУН НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева) за помощь при проведении полевых измерений.

### 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. Practical means for decontamination 9 years after a nuclear accident. Ed.: J. Roed, K.G. Andersson, H. Prip. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark. 1995.
2. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Пархоменко В.И., Пономарев А.В. Дезактивация населенных пунктов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 5–15.
3. Rääf C.L., Isaksson M., Martinsson J., Fink R. Time-dependence of decontamination efficiency after a fallout of gamma-emitting radionuclides in suburban areas: a theoretical outlook on topsoil removal // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 21656.
4. Roed J., Lange C., Andersson K.G., et al. Decontamination in a Russian settlement. RISØ National Laboratory report Risø-R-870 (EN). RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1996.
5. Fogh C.L., Andersson K.G., Barkovsky A.N., et al. Decontamination in a Russian settlement // Health Physics. 1999. Vol. 76. P. 421–430.
6. Evrard O., Laceby O.P., Nakao A. Effectiveness of landscape decontamination following the Fukushima nuclear accident: a review // SOIL. 2019. Vol. 5. P. 333–350.
7. Roed J., Andersson K.G., Barkovsky A.N., et al. Mechanical decontamination tests in areas affected by the Chernobyl accident. RISØ National Laboratory report Risø-R-1029 (EN). RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1998.
8. Ramzaev V., Barkovsky A., Mishine A., Andersson K.G. Decontamination tests in the recreational areas affected by the Chernobyl accident: efficiency of decontamination and long-term stability of the effects // Journal of the Society of Remediation for Radioactive Contamination in the Environment. 2013. Vol. 1, No. 2. P. 93–107.
9. Ramzaev V., Andersson K.G., Barkovsky A., et al. Long-term stability of decontamination effect in recreational areas near the town Novozybkov, Bryansk Region, Russia // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 85. P. 280–298.
10. Roed J., Andersson K.G., Barkovsky A.N., et al. Reduction of external dose in a wet contaminated housing area in the Bryansk Region, Russia // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 85. P. 265–279.
11. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in Bryansk region, Russia in 1996–2003 // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 85. P. 205–227.
12. Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 6–20.
13. Ramzaev V., Barkovsky A., Bernhardsson C., Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  contributions to ambient dose equivalent rate outdoors // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 18–29.
14. Ramzaev V., Bernhardsson C., Barkovsky A., et al. A backpack  $\gamma$ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate,  $H^*(10)$ , from  $^{137}\text{Cs}$  and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation // Radiation Measurements. 2017. Vol. 107. P. 14–22.
15. 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.
16. Ramzaev V., Barkovsky A., Goncharova Yu., et al. Radiocesium fallout in the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011 // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 118. P. 128–142.
17. Ramzaev V., Barkovsky A. Vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in grassland soils disturbed by moles (*Talpa europaea* L.) // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. Vol. 184–185. P. 101–108.
18. Golikov V., Barkovsky A., Kulikov V., et al. Gamma ray exposure due to sources in the contaminated forest. In: Linkov I., Schell W.R. (Eds.). Contaminated Forests – Recent Developments in Risk Identification and Future Perspective. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Contaminated Forests, Kiev, Ukraine. 27–30 June 1998. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1999. pp. 333–341.

19. Рамзаев В.П., Голиков В.Ю. Сравнение расчетных и измеренных значений мощности кермы в воздухе над почвой, загрязненной  $^{137}\text{Cs}$  // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 42–51.
20. IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments; Technical Report Series No. 472. Vienna. 2010.
21. 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.
22. 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.
23. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74 // Annals of the ICRP. 1996. Vol. 26. No. 3/4.

Поступила: 03.04.2023 г.

**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

**Для цитирования:** Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Оценка вторичного радиоактивного загрязнения деактивированного земельного участка, расположенного на территории зоны отдыха в лесистой местности // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 52–64. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-52-64

## Assessment of secondary radioactive contamination of a decontaminated land plot located on the territory of a recreation base in a wooded area

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

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

*The article presents results of a long-term (1998–2021) radiological monitoring survey of a recreation base located in a wooded area in the zone of radioactive contamination after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Local mechanical decontamination of the soil had been made on the territory of the base in 1997. The evaluation of the secondary radioactive contamination of the decontaminated territory was performed by comparing dynamics of the radiological situation at the treated plot and the control, non-decontaminated, part of the base according to four main criteria: 1) dose rate of gamma radiation in the air from cesium radionuclides; 2) inventory of  $^{137}\text{Cs}$  in soil; 3) vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in soil; 4) activity concentration of  $^{137}\text{Cs}$  in plants and fungi. In 1998, the value of the  $^{137}\text{Cs}$  inventory in the upper 20 cm of soil in the control part of the territory of the base and in the decontaminated plot was 930 kBq/m<sup>2</sup> and 143 kBq/m<sup>2</sup>, respectively. By 2015, the value of the  $^{137}\text{Cs}$  inventory in the control area and the decontaminated plot had significantly decreased: by 35% and 36%, respectively. A decrease in the dose rate of gamma radiation in the air at the decontaminated plot and control area proceeded at the same rate, which is currently mainly determined by the decay of  $^{137}\text{Cs}$ . There was a gradual self-restoration of the forest ecosystem at the plot subjected to decontamination. Activity concentration of  $^{137}\text{Cs}$  in biota (pine, edible mushrooms) in the treated plot was many times lower than that in the control part of the recreation base. In general, there was no significant secondary radioactive contamination of the decontaminated plot in the 24 years after the intervention.*

**Valery P. Ramzaev**

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene

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

**Key words:** Chernobyl accident,  $^{137}\text{Cs}$ , soil, forest, decontamination, long-term stability, secondary contamination.

### Authors' personal contribution

V.P. Ramzaev – conceptualization, measurements, writing the manuscript.

A.N. Barkovsky – conceptualization, editing of the manuscript.

### Acknowledgements

The authors thank junior researcher K.V. Varfolomeeva (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) for help with field measurements.

### 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

1. Practical means for decontamination 9 years after a nuclear accident. Ed.: J. Roed, K.G. Andersson, H. Prip. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark. 1995.
2. Balonov MI, Golikov VYu, Parkhomenko VI, Ponomarev AV. Decontamination of localities in the Bryansk region after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 5–15. (In Russian).
3. Råaf CL, Isaksson M, Martinsson J, Fink R. Time-dependence of decontamination efficiency after a fallout of gamma-emitting radionuclides in suburban areas: a theoretical outlook on topsoil removal. *Scientific Reports*. 2022;12: 21656.
4. Roed J, Lange C, Andersson KG, Prip H, Olsen S, Ramzaev VP, et al. Decontamination in a Russian settlement. RISØ National Laboratory report Risø-R-870 (EN). RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1996.
5. Fogh CL, Andersson KG, Barkovsky AN, Mishine AS, Ponomarev AV, Ramzaev VP, Roed J. Decontamination in a Russian settlement. *Health Physics*. 1999;76: 421–430.
6. Evrard O, Laceby OP, Nakao A. Effectiveness of landscape decontamination following the Fukushima nuclear accident: a review. *SOIL*. 2019;5: 333–350.
7. Roed J, Andersson KG, Barkovsky AN, Fogh CL, Mishine AS, Olsen S, et al. Mechanical decontamination tests in areas affected by the Chernobyl accident. RISØ National Laboratory report Risø-R-1029 (EN). RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1998.
8. Ramzaev V, Barkovsky A, Mishine A, Andersson KG. Decontamination tests in the recreational areas affected by the Chernobyl accident: efficiency of decontamination and long-term stability of the effects. *Journal of the Society of Remediation for Radioactive Contamination in the Environment*. 2013;1(2): 93–107.
9. Ramzaev V, Andersson KG, Barkovsky A, Fogh CL, Mishine A, Roed J. Long-term stability of decontamination effect in recreational areas near the town Novozybkov, Bryansk Region, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 280–298.
10. Roed J, Andersson KG, Barkovsky AN, Fogh CL, Mishine AS, Ponomarev AV, et al. Reduction of external dose in a wet contaminated housing area in the Bryansk Region, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 265–279.
11. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo S, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in Bryansk region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.
12. Ramzaev VP, Barkovsky AN. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 6–20.
13. Ramzaev V, Barkovsky A, Bernhardsson C, Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 18–29.
14. Ramzaev V, Bernhardsson C, Barkovsky A, Romanovich I, Jarneborn J, Mattsson S, et al. A backpack  $\gamma$ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate,  $\text{H}^*(10)$ , from  $^{137}\text{Cs}$  and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation. *Radiation Measurements*. 2017;107: 14–22.
15. 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).
16. Ramzaev V, Barkovsky A, Goncharova Yu, Gromov A, Kaduka M, Romanovich I. Radiocesium fallout in the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;118: 128–142.
17. Ramzaev V, Barkovsky A. Vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in grassland soils disturbed by moles (*Talpa europaea* L.). *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;184–185: 101–108.
18. Golikov V, Barkovsky A, Kulikov V, Balonov M, Rantavaara A, Vetikko V. Gamma ray exposure due to sources in the contaminated forest. In: Linkov I., Schell W.R. (Eds.). Contaminated Forests – Recent Developments in Risk Identification and Future Perspective. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Contaminated Forests, Kiev, Ukraine. 27–30 June 1998. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1999. pp. 333–341.
19. Ramzaev VP, Golikov VYu. A comparison of measured and calculated values of air kerma rates from  $^{137}\text{Cs}$  in soil. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 42–51. (In Russian).
20. IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments; Technical Report Series No. 472. Vienna. 2010.
21. 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).
22. 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).
23. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. *Annals of the ICRP*. 1996;26(3/4).

Received: April 03, 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

**For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Assessment of secondary radioactive contamination of a decontaminated land plot located on the territory of a recreation base in a wooded area. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 52-64. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-52-64**

# Облучение обучающихся и сотрудников детских учреждений Ленинградской области природными источниками излучения

## Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования

А.С. Васильев

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 настоящее время отсутствуют методические документы по проведению радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки как содержания радона в воздухе помещений, так и других параметров радиационной обстановки в эксплуатируемых зданиях. В статье приведен обзор методик радиационного контроля содержания радона в воздухе помещений детских учреждений некоторых зарубежных стран (США, Норвегия, Финляндия), а также представлены результаты собственного комплексного радиационного обследования 9 детских учреждений в 5 населенных пунктах Ленинградской области, в которых ранее были выявлены высокие уровни объемной активности радона в воздухе помещений интегральным методом. В ходе обследования экспрессным методом в воздухе отдельных помещений были получены высокие значения эквивалентной равновесной объемной активности радона как в режиме нормальной эксплуатации зданий (до 1106 Бк/м<sup>3</sup>), так и после предварительной 12-часовой выдержки помещений при закрытых окнах и дверях согласно пункту 6.5 МУ 2.6.1.2838-11 (до 1586 Бк/м<sup>3</sup>). Высокие значения объемной активности радона также были получены с помощью интегральных и квазиинтегральных методов измерений (до 4900 и 1420 Бк/м<sup>3</sup> соответственно). Кроме того, были выявлены высокие значения плотности потока радона с поверхности грунта (до 2030 мБк/(м<sup>2</sup>·с)). Ни в одном из обследованных населенных пунктов не было выявлено превышений установленных нормативов по величине мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на открытой местности и в помещениях детских учреждений. Значения удельной суммарной альфа- и бета-активности питьевой воды во всех обследованных детских учреждениях были ниже контрольных уровней, а удельной активности радона в воде — ниже уровня вмешательства. Полученные данные будут использованы для гигиенической оценки доз внутреннего облучения и радиационных рисков у обучающихся и сотрудников некоторых детских учреждений Ленинградской области за счет ингаляции изотопов радона и их короткоживущих дочерних продуктов распада и могут быть использованы для усовершенствования методики радиационного контроля содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий в Российской Федерации, что в дальнейшем позволит получать корректные значения доз облучения и радиационных рисков для здоровья населения.*

**Ключевые слова:** радон, дочерние продукты распада, экспрессные измерения, интегральные измерения, квазиинтегральные измерения, общественные здания, детские учреждения.

### Введение

Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений детских учреждений (ДУ) в последнее время представляет большой интерес как в России [1–4], так и за рубежом [5–10].

Еще в 1989–1990 гг. Агентство по охране окружающей среды США (US EPA) провело широкомасштабное общенациональное радоновое обследование и разработало методику проведения измерений содержания радона в воздухе помещений школ [11]. На официальном сайте

US EPA представлена исчерпывающая информация про измерения содержания радона в школах США [12]. Так, согласно требованиям протокола ANSI/AARST MALB-2014 с изменениями 1/2021 [13], измерения объемной активности (ОА) радона в воздухе помещений эксплуатируемых школ США проводятся в условиях типичной эксплуатации зданий (с включенной системой вентиляции, при закрытых дверях и окнах без выдержки по времени) в 2 этапа: первичное краткосрочное измерение (с использованием 2 детекторов квазиинтегрального типа или 1 монитора радона) и дополнительное долгосрочное измерение (с

**Васильев Алексей Серафимович**

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

использованием 1 детектора интегрального типа) в помещениях, где выявлены высокие значения ОА радона. При первичном краткосрочном измерении 2 детектора квазиинтегрального типа или 1 монитор радона, позволяющий ежечасно получать и аккумулировать информацию об ОА радона, устанавливаются на период не менее 48 ч во всех помещениях, непосредственно контактирующих с подстилающим грунтом (как правило, это помещения цокольного и первого этажа), а также в помещениях последующих этажей (на каждом этаже обследуется не менее 1 помещения с максимальным временем пребывания обучающихся или сотрудников или не менее 10% от всех помещений на этаже). Оценка содержания радона в воздухе помещений проводится на основании среднего результата непрерывного мониторинга или среднего значения двух результатов квазиинтегральных измерений, проведенных одновременно в одном и том же помещении, что позволяет снизить инструментальную погрешность измерения. Если ОА радона не превышает 2 пКи/л (74 Бк/м<sup>3</sup>), то здание по содержанию радона признается соответствующим требованиям нормативных документов, однако измерение повторяют через каждые 5 лет или каждый раз после проведения работ по ремонту/реконструкции фундамента здания или систем вентиляции/отопления. Если ОА радона в воздухе помещений варьирует от 2 до 4 пКи/л (74–148 Бк/м<sup>3</sup>), то необходимо задуматься о проведении радонозащитных мероприятий, а если ОА радона в каком-либо помещении равна или больше уровня действия (4 пКи/л или 148 Бк/м<sup>3</sup>), то проводится дополнительное долгосрочное измерение ОА радона с использованием трековых детекторов. Если результаты второго этапа подтверждают данные первичного краткосрочного измерения ОА радона, то радонозащитные мероприятия, указанные в стандарте ANSI/AARST RMS-LB-2018 с изменениями 12/2020 [14], необходимо провести в безотлагательном порядке.

Подсчитано, что только менее 2% измерений содержания радона в воздухе помещений США проводятся с использованием средств измерений (СИ) для долгосрочного измерения ОА радона [15]. Благодаря особенностям краткосрочных измерений и отлаженной системе коммуникации с населением в США проводится в 30–50 раз больше измерений содержания радона в воздухе помещений на 1000 человек, чем в Европе [16]. Несмотря на это, европейские страны, как правило, отдают предпочтение долгосрочным интегральным измерениям ОА радона, руководствуясь рекомендациями ISO 11665-4 [17], с целью минимизации влияния неопределенности, связанной с временными вариациями радона на конечный результат измерений. Так, в Норвегии в соответствии с Протоколом, утвержденным Норвежским управлением по радиационной защите (NRPA) в 2015 г. [18], измерения ОА радона в школах и детских садах проводятся также в 2 этапа. Первый этап (скрининговый) предназначен для обнаружения любых высоких уровней ОА радона, в то время как уровень ОА радона в часы фактического присутствия обучающихся и/или сотрудников определяется путем измерений на втором этапе. При этом на первом этапе используются интегральные методы измерений ОА радона, которые необходимо проводить не менее 2 месяцев в период с середины октября до середины апреля. Измерения ОА радона обязательно проводятся во всех

помещениях первого этажа с длительным пребыванием обучающихся и/или сотрудников (не менее 3 измерений в одном здании ДУ), при этом помещения должны эксплуатироваться в обычном режиме без изменения графика проветривания, вентиляции и отопления. Расположение трековых детекторов стандартное, согласно ISO 11665-1 [19] и ISO 11665-4 [17]. На основании полученных результатов рассчитываются среднегодовые значения ОА радона в воздухе помещений с применением поправочных коэффициентов в зависимости от типа вентиляции помещений и периода проведения измерений. Если во всех обследованных помещениях рассчитанная среднегодовая ОА радона ниже 100 Бк/м<sup>3</sup>, то дополнительные измерения не проводятся, здание по содержанию радона признается соответствующим требованиям нормативных документов. Но если ОА радона в одном или нескольких помещениях превышает 100 Бк/м<sup>3</sup>, то необходимо либо выполнить измерения второго этапа для уточнения содержания радона в периоды эксплуатации здания (в периоды фактического нахождения обучающихся и/или сотрудников в здании ДУ), либо провести радонозащитные мероприятия с последующими контрольными измерениями. Для второго этапа используемое СИ должно обеспечивать возможность регистрации ОА радона в воздухе не реже 1 раза в час, в связи с чем использование мониторов радона предпочтительнее и гарантирует качество измерений в соответствии с ISO 11665-5 [20]. Измерения второго этапа проводятся непрерывно в режиме нормальной эксплуатации здания в течение не менее 3 дней во всех помещениях, где по результатам первого этапа были выявлены высокие значения ОА радона. При увеличении периода обследования, например, до недели, достоверность полученных результатов, соответственно, увеличивается. Конечная оценка ОА радона проводится по формуле 1:

$$Rn = Rn_{I \text{ этап}} * \frac{Rn_{II \text{ этап, в часы присутствия людей}}}{Rn_{II \text{ этап, за весь период}}}, \text{ Бк/м}^3 \quad (1),$$

где  $Rn_{I \text{ этап}}$  – результаты измерения ОА радона первого этапа нтегральным методом;

$Rn_{II \text{ этап, в часы присутствия людей}}$  – результаты измерения ОА радона второго этапа с помощью монитора радона, выполненного в рабочее время в условиях нормальной эксплуатации помещения с включенной системой вентиляции (при наличии), т.е. средняя ОА радона в часы присутствия людей;

$Rn_{II \text{ этап, за весь период}}$  – результаты измерения ОА радона второго этапа с помощью монитора радона, т.е. средняя ОА радона за весь период измерений.

Аналогичную методику для измерений ОА радона в воздухе на рабочих местах предлагает коллектив финских специалистов по радиационной безопасности [21]: использовать результаты первичного интегрального измерения ОА радона и результаты дополнительного непрерывного мониторинга ОА радона (в течение недели) с помощью монитора радона, которой позволяет получить как среднюю ОА радона в рабочее время за 7 дней, так и среднее значение ОА радона за всю неделю. Оценка также проводится на основании расчета отношения между этими средними значениями, умноженное на результат первичного интегрального измерения ОА радона. Коэффициент вариации этого метода оценивается

в 19% и увеличивается до 32% при использовании только результатов недельного непрерывного мониторинга ОА радона.

В РФ в настоящее время отсутствуют методические документы по проведению радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки параметров радиационной обстановки в эксплуатируемых зданиях, в том числе дошкольных и школьных образовательных учреждениях, в связи с чем не регламентирован выбор и приоритетность использования того или иного метода, длительность и условия проведения измерений содержания радона в воздухе таких помещений, что может приводить к получению недостоверной информации, дальнейшей неправильной интерпретации полученных результатов, принятию на их основе ошибочных управленческих решений [22].

Так, например, проведение измерений содержания радона в воздухе помещений общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей после предварительной 12-часовой выдержки помещений при закрытых окнах и дверях (при вынужденном использовании методических указаний МУ 2.6.1.2838-11<sup>1</sup> [22, 23], не предназначенных для обследования эксплуатируемых зданий и не учитывающих нормальный повседневный режим эксплуатации помещений), искажает реальную ситуацию облучения в таких зданиях и приводит к получению завышенных результатов измерений.

Территориальные органы Роспотребнадзора за последние годы в некоторых субъектах РФ принимали решения о приостановлении учебного/воспитательного

процесса как в отдельных группах/классах в организациях, осуществляющих образовательную деятельность, так и во всем здании из-за повышенного содержания радона, однако последующие детальные обследования не подтверждали высоких уровней содержания радона в воздухе помещений в часы работы ДУ [22].

Сложившаяся ситуация серьезно затрудняет организацию и проведение обследований эксплуатируемых ДУ, снижает качество и достоверность получаемой информации как о реальных уровнях содержания радона в воздухе помещений, так и о дозах облучения и радиационных рисках.

**Цель исследования** – определение основных показателей природного облучения обучающихся и сотрудников некоторых ДУ с применением различных средств и подходов к измерению содержания радона в воздухе помещений, необходимых для дальнейшей гигиенической оценки доз облучения и радиационных рисков за счет ингаляции изотопов радона.

### Материалы и методы

Измерения содержания радона в воздухе помещений были проведены в 2022 г. только в отопительный (холодный) период года в 9 ДУ Ленинградской области, в которых ранее интегральным методом были выявлены высокие уровни ОА радона в воздухе помещений [4, 24]. Информация о строительно-конструктивных характеристиках обследованных зданий представлена в таблице 1.

Характеристика зданий ДУ

Таблица 1

Characteristics of buildings of educational institutions]

[Table 1

Тип здания, населенный пункт [Type of institution, settlement]	Год постройки [Year of construction]	Количество этажей [Number of floors]	Наличие подвала [Basement]	Материал стен [Building material]	Тип окон [Type of windows]	Отопление [Heating]
Детский сад, д. Клопицы [Kindergarten, Klopitsy]	1972	2	Есть [yes]	Кирпич [brick]	С [DGW]	Ц [C]
Детский сад, п. Сельцо [Kindergarten, Sel'tso]	1963	2	Нет [no]	Панели [sandwich panel]	С [DGW]	Ц [C]
Школа, п. Сельцо [School, Sel'tso]	1953*/ 2019**	2*/3**	Нет*/есть** [no*/yes**]	Кирпич [brick]	С [DGW]	Ц [C]
Детский сад № 3, г. Кингисепп [Kindergarten No. 3, Kingisepp]	1983	2	Есть [yes]	Кирпич [brick]	С [DGW]	Ц [C]
Школа № 5, г. Кингисепп [School No. 5, Kingisepp]	1985	3	Есть [yes]	Панели [sandwich panel]	С [DGW]	Ц [C]
Школа № 6, г. Кингисепп [School No. 6, Kingisepp]	1975	3	Есть [yes]	Панели [sandwich panel]	С, Д [DGW, W]	Ц [C]

<sup>1</sup> Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011 г. (далее – МУ 2.6.1.2838-11) [Radiation control and sanitary and epidemiological assessment of residential, public and industrial buildings and facilities after their construction, overhaul repair, reconstruction. Guidelines MU 2.6.1.2838-11. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 28.01.2011 (hereinafter – MU 2.6.1.2838-11). (In Russ.)]

Тип здания, населенный пункт [Type of institution, settlement]	Год постройки [Year of construction]	Количество этажей [Number of floors]	Наличие подвала [Basement]	Материал стен [Building material]	Тип окон [Type of windows]	Отопление [Heating]
Детский сад № 2, п. Сосново [Kindergarten № 2, Sosново]	1960	2	Нет [no]	Кирпич [brick]	С [DGW]	Ц [C]
	1971	1	Нет [no]	Кирпич [brick]	С [DGW]	Ц [C]
Детский сад, д. Большие Колпаны [Kindergarten, Bol'shie Kolpany]	1982	2	Есть [yes]	Панели [sandwich panel]	С [DGW]	Ц [C]
Школа, д. Большие Колпаны [School, Bol'shie Kolpany]	1966* / 1990**	3	Нет*/ есть** [no*/ yes**]	Кирпич*/ панели** [brick*/sandwich panel**]	С [DGW]	Ц [C]

С – стеклопакеты, Д – деревянные, Ц – централизованное, \* – старое здание школы, \*\* – новая пристройка к зданию школы.  
[DGW – double-glazed windows, W – wooden, C – centralized, \* – old school building, \*\* – new extension to the school building.]

В каждом ДУ были повторно проведены интегральные измерения ОА радона с использованием комплекта аппаратуры «ТРЕК-РЭИ-1М» (ООО «Группа компаний РЭИ», Россия) с длительностью непрерывного экспонирования интегральных трековых радиометров радона (ИТРП) от 30 до 72 сут. На каждое ДУ было установлено от 4 до 17 ИТРП в зависимости от размера ДУ и количества задействованных в образовательном процессе помещений; потери при сборе ИТРП составили 3,6%. ИТРП размещались преимущественно в помещениях с наиболее длительным пребыванием обучающихся: в школах это учебные классы, в детских садах – игровые комнаты и комнаты для дневного сна. В школе и детском саду д. Большие Колпаны Гатчинского района также были проведены измерения ОА радона квазиинтегральным методом с использованием измерительного комплекса «КАМЕРА-01» (ЗАО «НТЦ «НИТОН», Россия) с длительностью экспонирования сорбционных колонок СК-13 с активированным углем от 51 до 53 ч.

Во всех ДУ серии экспрессных измерений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона проводились с применением радиометров «Альфарад плюс А» и «Альфарад плюс АРП» (ООО «НТМ-Защита», Россия) в режиме «ЭРОА 5» несколько раз в день в течение 3–5 последовательных рабочих дней: после 12-часовой выдержки помещений с закрытыми дверями и окнами (согласно п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11) и в режиме нормальной эксплуатации здания (в будние дни в часы работы ДУ, в присутствии обучающихся и/или сотрудников, при соблюдении кратности и времени проветривания, предписанных санитарными правилами). В некоторых помещениях ДУ с высокими уровнями ЭРОА радона по результатам экспрессных измерений были установлены радоновые мониторы AlphaGUARD RQ2000PRO (Genitron Instruments GmbH, Германия) с периодом регистрации результата измерения ОА радона 1 ч или 10 мин.

Все измерения были выполнены с помощью СИ, прошедших в установленном порядке поверку. Характеристики используемых СИ и методики измерений содержания радона в воздухе помещений детально представлены в более ранней публикации [25].

Статистический анализ полученных результатов был проведен с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2016, Statistica 10 и включал расчет основных показателей описательной статистики, а именно минимальное, максимальное и медианное значения, среднее геометрическое с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение и среднее арифметическое. Для анализа данных были построены гистограммы частотного распределения; анализ характера распределений значений ОА (ЭРОА) радона и натурального логарифма ОА (ЭРОА) радона и степени их соответствия логнормальному и нормальному законам проводился с помощью тестов Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка. Непараметрический критерий Вилкоксона использовался для проверки значимости различий между парами выборок.

Всего в 9 ДУ было обследовано 132 помещения с длительным пребыванием обучающихся и/или сотрудников, выполнено более 650 измерений ЭРОА изотопов радона экспрессным методом, более 80 измерений ОА радона интегральным методом, 25 измерений ОА радона квазиинтегральным методом и 5 серий непрерывных измерений ОА радона мониторами радона. Для корректной оценки доз облучения и радиационных рисков у обучающихся и сотрудников ДУ за счет ингаляции изотопов радона также были проведены 40 интегральных измерений ОА радона в воздухе жилых домов некоторых сотрудников обследованных ДУ в помещениях с максимальным пребыванием в них жильцов (спальнях или гостиных), расположенных преимущественно на первом этаже и 7 – на открытой местности 5 населенных пунктов Ленинградской области; потери при сборе ИТРП составили 2,4% и 12,5% соответственно.

Для перехода от измеренных значений ОА радона к ЭРОА радона использовалось значение коэффициента радиоактивного равновесия между радонам и его дочерними продуктами распада (ДПР)  $F_{rn}=0,5$  для воздуха помещений и  $F_{rn}=0,6$  для атмосферного воздуха.

В рамках комплексного радиационного обследования также были проведены: 57 измерений плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта на прилегающей территории ДУ или в подвальных помещениях (при их

наличии) с использованием измерительного комплекса «КАМЕРА-01» (ЗАО «НТЦ «НИТОН», Россия); 40 измерений мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения на открытой местности прилегающей территории 9 ДУ в 5 населенных пунктах Ленинградской области на высоте 1 м от поверхности грунта с применением дозиметра-радиометра МКС-АТ1125 («АТОМТЕХ», Беларусь); 132 измерения МАЭД гамма-излучения в помещениях 9 ДУ на высоте 1 м от поверхности пола в центре помещения с применением дозиметра-радиометра МКС-АТ1125 («АТОМТЕХ», Беларусь); 4 измерения удельной активности (УА) радона в пробах питьевой воды с помощью радиометра AlphaGUARD PQ2000PRO (Genitron Instruments GmbH, Германия), а также суммарных показателей удельной альфа- и бета-активности в пробах питьевой воды 4 населенных пунктов с использованием альфа-бета-радиометра УМФ-2000 (ООО «НПП «Доза», Россия); 5 измерений УА природных радионуклидов (ПРН) и УА техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы с прилегающей территории ДУ или подсыпки в подвальных помещениях с глубины 0–0,1 м с применением спектрометрической установки МКС-01А «Мультирад» (ООО «НТЦ «Амплитуда», Россия) с дальнейшим расчетом эффективной удельной активности ( $A_{\text{эфф}}$ ) ПРН в соответствии с Приложением 7 к СанПиН 2.6.1.2800-10.

### Результаты и обсуждение

Во всех обследованных помещениях ДУ результаты экспрессных измерений ЭРОА торона не превысили значения нижней границы диапазона измерений (НГДИ) используемых СИ ( $0,5 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ), поэтому далее не приводятся.

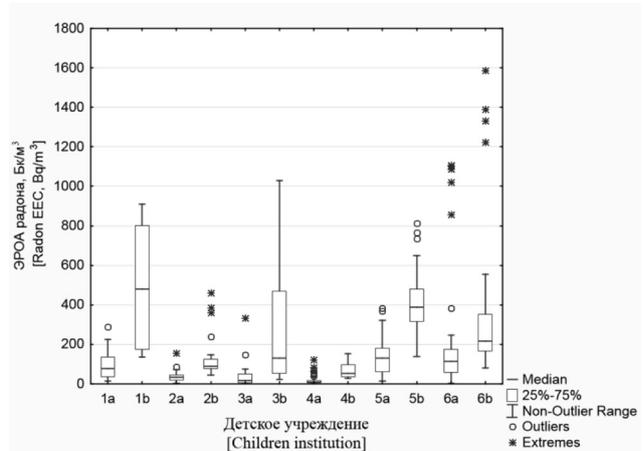
Тесты Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка подтвердили гипотезу о соответствии результатов измерений содержания радона в воздухе помещений логнормальному распределению для всех ДУ, таким образом, устойчивой к выбросам (робастной) мерой центральной тенденции для всех полученных выборок является среднее геометрическое [26, 27].

Обобщенные результаты серий экспрессных измерений ЭРОА радона в воздухе помещений ДУ, выполненных в будние дни сначала после 12-часовой выдержки помещений с закрытыми дверями и окнами (согласно п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11), а затем в режиме нормальной эксплуатации здания, представлены на рисунке 1.

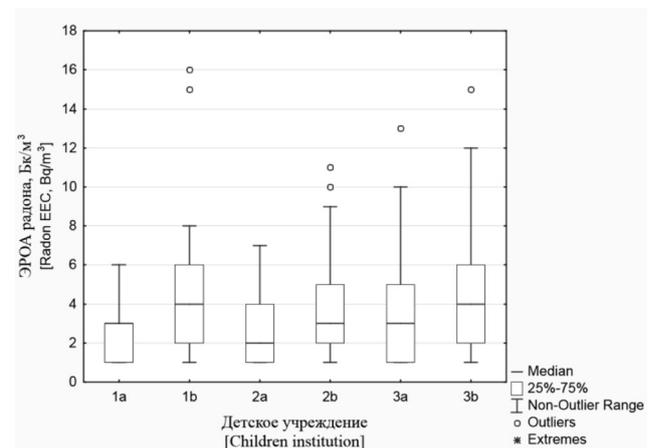
Получено, что медианные значения ЭРОА радона по результатам многократных экспрессных измерений, выполненных с соблюдением требований п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11, находились в диапазоне от 52 до  $481 \text{ Бк}/\text{м}^3$  для разных ДУ. Однако при выполнении измерений в рабочее время в режиме нормальной эксплуатации зданий как наиболее соответствующем реальному сценарию облучения обучающихся и сотрудников ДУ медианные значения ЭРОА радона были ниже в 2–7 раз для разных ДУ и находились в диапазоне от 9 до  $130 \text{ Бк}/\text{м}^3$ , за исключением ДУ г. Кингисеппа. Расчет Т-критерия Вилкоксона показал, что значения ЭРОА радона в воздухе помещений ДУ достоверно отличаются в зависимости от подхода к его измерению ( $p < 0,05$ ).

В ДУ г. Кингисеппа в режиме нормальной эксплуатации зданий значения ЭРОА радона варьировались в очень узком диапазоне от НГДИ ( $1 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ) до  $13 \text{ Бк}/\text{м}^3$  (несмотря на высокие значения ОА радона, полученные интеграль-

ным методом в 2020 г.), а 12-часовая выдержка помещений с закрытыми дверями и окнами не приводила к существенному накоплению радона в воздухе помещений (рис. 2).



**Рис. 1.** Диаграммы размаха результатов серий экспрессных измерений ЭРОА радона в воздухе помещений ДУ (1 – детский сад, д. Клопицы; 2 – детский сад, п. Сельцо; 3 – школа, п. Сельцо; 4 – детский сад, п. Сосново; 5 – детский сад, д. Большие Колпаны; 6 – школа, д. Большие Колпаны; а – в режиме нормальной эксплуатации здания ДУ; б – после 12-часовой выдержки помещений с закрытыми дверями и окнами) [Fig. 1. Box-and-whisker plot of results of a series of instant measurements of indoor radon EEC in educational institutions (1 – Kindergarten, Klopitsy; 2 – Kindergarten, Sel'tso; 3 – School, Sel'tso; 4 – Kindergarten, Sosnovo; 5 – Kindergarten, Bol'shie Kolpany; 6 – School, Bol'shie Kolpany; a – in the normal operation mode of the building of educational institution; b – after 12 hours with closed doors and windows)]



**Рис. 2.** Диаграммы размаха результатов серий экспрессных измерений ЭРОА радона в воздухе помещений ДУ г. Кингисеппа (1 – детский сад № 3; 2 – школа № 5; 3 – школа № 6; а – в режиме нормальной эксплуатации здания ДУ; б – после 12-часовой выдержки помещений с закрытыми дверями и окнами) [Fig. 2. Box-and-whisker plot of results of a series of instant measurements of indoor radon EEC in educational institutions of Kingisepp (1 – kindergarten No. 3; 2 – school No. 5; 3 – school No. 6; a – in the normal operation mode of the building of educational institution; b – after 12 hours with closed doors and windows)]

Таблица 2  
[Table 2]

Обобщенные результаты измерений содержания радона в воздухе помещений обследованных ДУ (экспрессный, интегральный и квазиинтегральный методы)  
[Averaged results of measurements of indoor radon EEC in nine surveyed educational institutions (instant, long-term and short-term measurements)]

Детское учреждение, населенный пункт [educational institution, settlement]	ЭРОА <sub>ин</sub> (экспрессный метод), Бк/м <sup>3</sup> [Radon EEC (instant measurements), Bq/m <sup>3</sup> ]			ЭРОА <sub>ин</sub> (интегральный метод), Бк/м <sup>3</sup> [Radon EEC (long-term measurements), Bq/m <sup>3</sup> ]			ЭРОА <sub>кв</sub> (квазиинтегральный метод), Бк/м <sup>3</sup> [Radon EEC (short-term measurements), Bq/m <sup>3</sup> ]			R <sub>ср</sub> , отн. ед. [rel. un.]	R <sub>ср</sub> , отн. ед. [rel. un.]			
	Med (min-max)	GM (CI95)	GSD	AM	Med (min-max)	GM (CI95)	GSD	AM	Med (min-max)	GM (CI95)	GSD	AM		
Детский сад, д. Клопицы [Kindergarten, Klopitsy]	77 (13-289)	70 (46-104)	2,5	99	815 (313-1228)	667 (431-1032)	2,0	793	-	-	-	-	10,6 (5,7-9,4)	-
Детский сад, п. Сельцо [Kindergarten, Sel'tso]	34 (4-155)	30 (23-38)	2,1	38	118 (75-680)	145 (88-237)	2,2	202	-	-	-	-	3,5 (2,0-14,4)	-
Школа, п. Сельцо [School, Sel'tso]	18 (1-333)	19 (12-29)	3,5	39	165 (10-1150)	166 (56-496)	5,8	422	-	-	-	-	9,2 (0,9-145,0)	-
Детский сад № 3, г. Кингисепп [Kindergarten No. 3, Kingisepp]	3 (1-6)	2 (2-3)	2,0	3	15 (7-45)	17 (10-27)	2,2	22	-	-	-	-	5,0 (1,1-15,0)	-
Школа № 5, г. Кингисепп [School No. 5, Kingisepp]	2 (1-7)	2 (2-2)	1,9	2	5 (5-109)	10 (6-16)	2,6	18	-	-	-	-	2,5 (1,0-21,7)	-
Школа № 6, г. Кингисепп [School No. 6, Kingisepp]	3 (1-13)	3 (2-4)	2,4	4	8 (5-55)	10 (7-15)	2,0	14	-	-	-	-	2,7 (0,8-12,5)	-
Детский сад № 2, п. Сосново [Kindergarten No. 2, Sosnovo]	9 (1-123)	9 (7-12)	3,2	17	78 (25-333)	85 (48-151)	2,3	115	-	-	-	-	8,7 (2,8-22,2)	-
Детский сад, д. Большие Колпаны [Kindergarten, Bol'shie Kolpany]	130 (14-382)	105 (89-124)	2,1	135	594 (330-750)	537 (451-638)	1,3	555	203 (117-351)	196 (160-239)	1,4	205	4,6 (2,0-8,4)	1,6 (1,0-3,0)
Школа, д. Большие Колпаны [School, Bol'shie Kolpany]	113 (3-1106)	92 (71-118)	3,3	168	300 (100-2450)	316 (240-416)	2,1	438	108 (45-710)	125 (89-174)	1,9	160	2,7 (1,1-68,0)	1,0 (0,3-21,5)

min, max, med – минимальное, максимальное и медианное значение (в скобках – 95% доверительный интервал); GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение; R<sub>ср</sub> – отношение медианного значения по результатам интегральных измерений к медианному значению по результатам экспрессных измерений (с диапазоном по отдельным помещениям), R<sub>ср</sub> – отношение медианного значения по результатам квазиинтегральных измерений к медианному значению по результатам экспрессных измерений (с диапазоном по отдельным помещениям)

[min, max, med – minimum, maximum and median values; GM (CI95) – geometric mean (with 95% confidence interval); GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean; R<sub>ср</sub> – ratio of median value of long-term measurement results to median value of instant measurement results (range for individual premises), R<sub>ср</sub> – ratio of median value of short-term measurement results to median value of instant measurement results (range for individual premises). Standard Russian value of equilibrium factor F=0.5 is used throughout the paper for conversion of radon concentration into EEC where necessary (long-term, short-term and radon monitor measurement results)].

С учетом неопределенности результатов измерений, полученные экспрессные значения ЭРОА радона в течение дня в ДУ г. Кингисеппа не позволяют провести корректное сравнение уровней содержания радона в воздухе в зависимости от подходов к его измерению. Повторное детальное обследование ДУ г. Кингисеппа показало, что в этих зданиях нет проблем с радиационной безопасностью по фактору «радон», и поэтому полученные в них результаты неприменимы для задачи научного обоснования методики радиационного контроля содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий.

Результаты комплексного статистического анализа данных о содержании радона в воздухе помещений в каждом из обследованных ДУ, а также сопоставление результатов экспрессных измерений ЭРОА радона, выполненных в будние дни в часы работы ДУ, с результатами измерений интегральным и квазиинтегральным методами представлены в таблице 2.

Медианные значения результатов интегральных измерений ОА радона, пересчитанные в значения ЭРОА, составили от 5 до 815 Бк/м<sup>3</sup> для разных ДУ, то есть они превышают соответствующие медианные значения результатов многократных экспрессных измерений ЭРОА радона, выполненных в режиме нормальной эксплуатации здания, от 3 до 10 раз из-за непрерывного экспонирования ИТРР, включая периоды фактического отсутствия людей в зданиях ДУ (в ночное время, выходные, праздничные дни). Напротив, медианные значения результатов квазиинтегральных измерений ОА радона в воздухе помещений ДУ д. Большие Колпаны показывают неплохую сходимость с результатами многократных экспрессных измерений ЭРОА радона, выполненных в дневное время в присутствии обучающихся и сотрудников.

На временных сериях результатов измерений с помощью мониторов радона выявлялись выраженные паттерны суточного изменения ОА радона в воздухе помещений, обусловленные, в первую очередь, режимом эксплуатации помещений (рис. 3).

В разновозрастной группе 3–5 лет, расположенной на первом этаже МДОУ «Детский сад № 11» д. Клопицы, медианное значение ОА радона в будние дни в рабочее время (с 7:00 до 19:00) на протяжении всего периода обследования составило 1016 Бк/м<sup>3</sup>, что в 3,8 раза меньше, чем в ночное время. Аналогичные данные были получены и другими авторами [28]. Однако на рисунке 3 заметно, что из-за интенсивной эксхалляции радона с поверхности подстилающего грунта и невозможности проводить регулярное проветривание помещения в присутствии воспитанников детского сада ОА радона в дневное время имеет выраженные колебания от 360 до 2320 Бк/м<sup>3</sup>. При экспрессных измерениях (менее 1 ч) в случайные моменты времени другими авторами [29, 30] также описываются суточные вариации ЭРОА радона в воздухе помещений, предварительно выдержанных с закрытыми дверями и окнами, которые могут достигать 400%. Учитывая это, а также принимая во внимание отсутствие мониторов радона во многих ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъектах РФ, более корректной является оценка содержания радона по результатам многократных экспрессных измерений ЭРОА радона (в виде среднего значения), проведенных спустя 1 ч после последнего проветривания в течение нескольких рабочих дней, а не по результатам единичного измерения в случайный момент времени.

Медианные значения ОА радона на каждый час суток, полученные с помощью мониторов радона для некоторых помещений ДУ, представлены на рисунках 4–7.

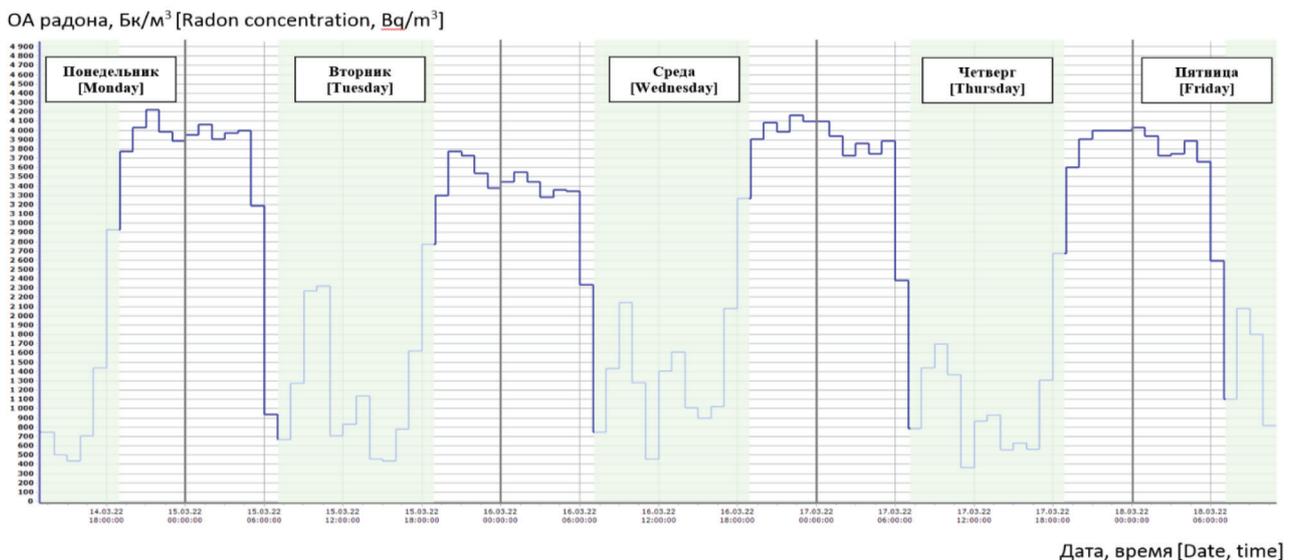
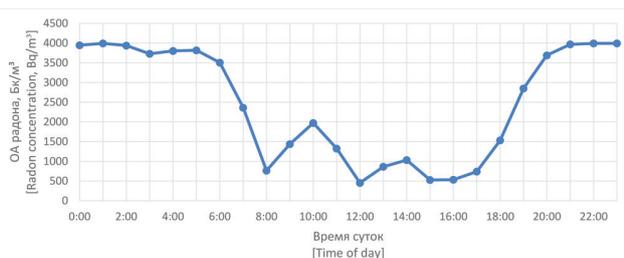


Рис. 3. Временная серия результатов измерений ОА радона с помощью монитора AlphaGUARD в МДОУ «Детский сад № 11» д. Клопицы (разновозрастная группа 3–5 лет, 14–18 марта 2022 г.)

[Fig. 3. Time series of radon concentration measurement results (AlphaGUARD) in Klopitsy, kindergarten, age group 3-5 years (March 14–18, 2022)]



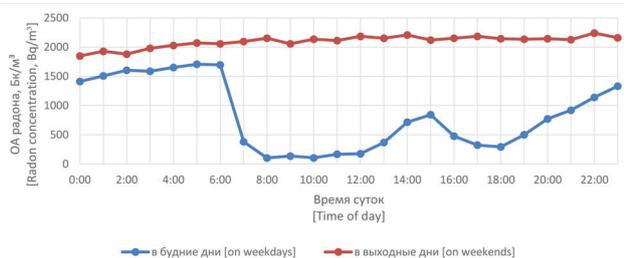
**Рис. 4.** Динамика медианных значений ОА радона в разновозрастной группе детского сада д. Клопицы (в будние дни, 14–18 марта 2022 г.)

[Fig. 4. Radon monitoring median values in the group of different ages of the kindergarten in the Klopitsy (on weekdays, March 14–18, 2022)]



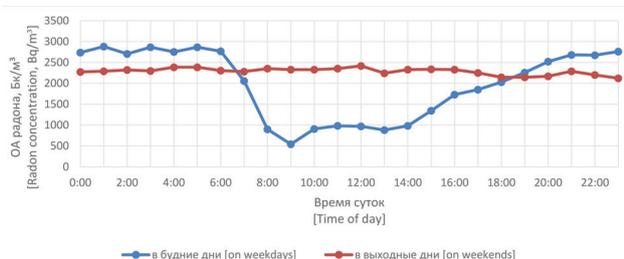
**Рис. 5.** Динамика медианных значений ОА радона в медицинском кабинете детского сада п. Сосново (в будние дни, 18–20 апреля 2022 г.)

[Fig. 5. Radon monitoring median values in the medical office of the kindergarten in the Sosново (on weekdays, April 18–20, 2022)]



**Рис. 6.** Динамика медианных значений ОА радона в спальне группы «Колокольчик» детского сада д. Большие Колпаны (28 ноября – 5 декабря 2022 г.)

[Fig. 6. Radon monitoring median values in the bedroom of the “Kolokol’chik” group of the kindergarten in the Bol’shie Kolpany (November 28 – December 05, 2022)]



**Рис. 7.** Динамика медианных значений ОА радона в кабинете методистов детского сада д. Большие Колпаны (28 ноября – 5 декабря 2022 г.)

[Fig. 7. Radon monitoring median values in the methodologists’ office of the kindergarten in the Bol’shie Kolpany (November 28 – December 05, 2022)]

На рисунках 4–7 хорошо прослеживается взаимосвязь ОА радона с режимом эксплуатации ДУ и графиком проветривания помещений: уровень содержания радона в воздухе помещений ночью в будние дни (при отсутствии обучающихся и/или сотрудников) значительно превышал соответствующий уровень в часы работы ДУ. В разновозрастной группе детского сада д. Клопицы, в которой нет разделения спальня и игровой зон, отчетливо прослеживается снижение ОА радона после 10 ч во время дневной прогулки воспитанников и к 15 ч к моменту окончания дневного сна (см. рис. 4). В спальне группы «Колокольчик» детского сада д. Большие Колпаны увеличение ОА радона в будние дни регистрировалось после 12 ч к началу тихого часа и уменьшалась после его окончания (см. рис. 6). На рисунках 5 и 7 сложнее описать ход кривой ОА радона в рабочее время, так как проветривание в таких помещениях носит спорадический характер и обусловлено скорее индивидуальными предпочтениями параметров микроклимата работников. Тем не менее, в обоих случаях медианное значение ОА радона в будние дни в рабочее время (с 7:00 до 19:00) было в 2 раза меньше, чем в ночное время.

В таблице 3 представлены результаты интегральных измерений содержания радона в воздухе помещений жилых домов некоторых сотрудников обследованных ДУ, а также результаты измерений на открытой местности.

Территория обследованных ДУ характеризуется достаточно ровным полем гамма-излучения; все измеренные значения МАЭД гамма-излучения находятся в диапазоне от менее 0,10 до 0,15 мкЗв/ч на участках с асфальтобетонным покрытием и с учетом неопределенности результатов измерений не превышают 0,20 мкЗв/ч. Максимальное измеренное значение МАЭД гамма-излучения в помещениях ДУ составляет 0,20 мкЗв/ч (в МДОУ «Детский сад № 11» д. Клопицы) и с учетом неопределенности результатов измерений не превышает 0,27 мкЗв/ч. Значимых различий в результатах измерений в зависимости от типа зданий и этажности ДУ выявлено не было. Ни в одном из обследованных помещений ДУ значение МАЭД гамма-излучения не превышает более чем на 0,3 мкЗв/ч аналогичный показатель для открытой местности на прилегающей территории ДУ, что в полной мере соответствует требованиям нормативных документов к эксплуатируемым общественным зданиям.

Анализ характеристик зданий, распределения уровней содержания радона по этажам и результатов измерения ППР с поверхности грунта на прилегающей территории ДУ или в подвальных помещениях (табл. 4) позволил достоверно установить источник поступления радона в воздух помещений – грунт под зданием, содержащий <sup>238</sup>U (<sup>226</sup>Ra).

Доля контрольных точек в подвале школы и детского сада д. Большие Колпаны, детского сада д. Клопицы, в которых значение ППР было больше значения гигиенического норматива, установленного равным 80 мБк/(м<sup>2</sup>·с) для участков территорий под строительство зданий жилищного и общественного назначения (п. 5.1.6 ОСПОРБ 99/2010), составило 100%, на прилегающей территории детского сада д. Клопицы – 50%, на прилегающей территории детского сада п. Сельцо – 20%, на прилегающей территории школы п. Сельцо – 10%, на прилегающей территории детского сада п. Сосново – 0%.

Таблица 3

Обобщенные результаты измерений содержания радона в воздухе помещений жилых домов и на открытой местности [Table 3]

Averaged results of measurements of indoor radon EEC in dwellings and outdoor radon EEC

Населенный пункт [Settlement]	ЭРОА <sub>rn</sub> (интегральный метод), Бк/м <sup>3</sup> [Radon EEC (long-term measurements), Bq/m <sup>3</sup> ]							
	Жилые дома [Dwellings]				Атмосферный воздух [Outdoor air]			
	Med (min-max)	GM (CI95)	GSD	AM	Med (min-max)	GM (CI95)	GSD	AM
д. Клопицы [Klopitsy]	154 (10-223)	99 (48-206)	3,3	140	11 (8-13)	11 (8-13)	1,4	11
п. Сельцо [Sel'tso]	33 (23-1170)	70 (26-193)	5,1	265	15 (13-17)	15 (13-17)	1,2	15
г. Кингисепп [Kingisepp]	20 (5-75)	16 (10-24)	2,4	23	5	-	-	-
п. Сосново [Sosnovo]	38 (7-223)	35 (19-65)	3,5	66	4	-	-	-
д. Большие Колпаны [Bol'shie Kolpany]	34 (20-180)	40 (25-64)	2,1	54	18	-	-	-

min, max, med – минимальное, максимальное и медианное значения; GM (CI95) – среднее геометрическое значение (в скобках – 95% доверительный интервал); GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение [min, max, med – minimum, maximum and median values; GM (CI95) – geometric mean (with 95% confidence interval); GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean.]

Таблица 4

Результаты измерений УА радионуклидов в грунтах, ППП с поверхности грунта и экспрессных измерений ЭРОА радона в подвальных помещениях

[Table 4]

Results of measurements of activity concentration of radionuclides in soils, radon flux density and instant measurements of radon EEC in the basements

Детское учреждение, населенный пункт [Educational institution, settlement]	УА радионуклидов в грунтах, Бк/кг [Activity concentration of radionuclides in soil samples, Bq/kg]					ППП, мБк/(м <sup>2</sup> ·с) [RFD, mBq/m <sup>2</sup> ·s]	ЭРОА <sub>rn</sub> в подвале, Бк/м <sup>3</sup> [Radon EEC in the basement, Bq/m <sup>3</sup> ]
	A <sub>Th</sub>	A <sub>Ra</sub>	A <sub>K</sub>	A <sub>эфф</sub> [A <sub>eff</sub> ]	A <sub>Cs</sub>		
	Среднее арифметическое (диапазон), стандартное отклонение [Arithmetic mean (range), standard deviation]						
Детский сад, д. Клопицы [Kindergarten, Klopitsy]	26 (16-35), 13	25 (23-27), 3	812 (789-835), 33	132 (119-144), 18	13 (<3-23), 14	103 (50-183), 55 (852 (562-1170), 220**	2039±719
Детский сад, п. Сельцо [Kindergarten, Sel'tso]	16±5	16±5	541±123	85±14	52±9	57 (8-195), 54	-
Школа, п. Сельцо [School, Sel'tso]	21±6	22±6	525±105	97±14	19±4	59 (6-384), 116	59±21
Детский сад № 2, п. Сосново [Kindergarten № 2, Sosnovo]	25 (24-25), 1	34 (32-36), 3	624 (613-635), 16	122 (120-124), 3	4 (4-4), 0	15 (3-28), 7	-
Детский сад, д. Большие Колпаны [Kindergarten, Bol'shie Kolpany]	-	-	-	-	-	782 (254-1790), 499**	772±283
Школа, д. Большие Колпаны [School, Bol'shie Kolpany]	16 (16-16), 0*	18 (16-19), 2*	570 (564-575), 8*	90 (88-92), 3*	<3*	593 (182-2030), 614**	865±325

A<sub>Th</sub>, A<sub>Ra</sub>, A<sub>K</sub>, A<sub>Cs</sub> – удельная активность <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>40</sup>K и <sup>137</sup>Cs соответственно; A<sub>эфф</sub> – эффективная удельная активность природных радионуклидов; \* – исследовалась подсыпка, отобранная из небетонированного подвала школы; \*\* – исследование проводилось в небетонированном подвале ДУ

[A<sub>Th</sub>, A<sub>Ra</sub>, A<sub>K</sub>, A<sub>Cs</sub> – activity concentration of <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>40</sup>K and <sup>137</sup>Cs, respectively; A<sub>eff</sub> – effective activity concentration of natural radionuclides: A<sub>eff</sub> = A<sub>Ra</sub> + 1,3 · A<sub>Th</sub> + 0,09 · A<sub>K</sub>; \* – the filling sampled from the non-concreted basement of the school was studied; \*\* – the measurement was taken in the non-concreted basement of the educational institution.]

Значения удельной суммарной альфа- и бета-активности питьевой воды во всех обследованных ДУ были ниже контрольных уровней (0,2 и 1,0 Бк/кг), а УА  $^{222}\text{Rn}$  – ниже уровня вмешательства (60 Бк/кг).

### Заключение

Неправильный выбор средств и подходов к измерению содержания радона в воздухе помещений ДУ из-за отсутствия утвержденного методического документа, регламентирующего процедуру радиационного контроля для таких зданий, может приводить к получению недостоверной измерительной информации и дальнейшей ее неправильной интерпретации.

Результаты экспрессных измерений ЭРОА радона, выполненные при вынужденном использовании МУ 2.6.1.2838-11 и соблюдении требований п. 6.5, как и результаты интегральных измерений ОА радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий, являются завышенными по сравнению с результатами многократных экспрессных измерений ЭРОА радона, выполненных на протяжении нескольких рабочих дней в рабочее время в присутствии обучающихся и/или сотрудников, в среднем от 2 до 7 раз и от 3 до 10 раз соответственно, что подтверждается результатами непрерывного радонового мониторинга, выполненного в некоторых помещениях ДУ, и хорошо согласуется с более ранними собственными исследованиями [25] и результатами других авторов [31, 32].

Полученные данные будут использованы для гигиенической оценки доз внутреннего облучения и радиационных рисков у обучающихся и сотрудников некоторых ДУ Ленинградской области за счет ингаляции изотопов радона и их ДПР и могут быть использованы для усовершенствования методики радиационного контроля содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий в РФ, что в дальнейшем позволит получать корректные значения доз облучения и радиационных рисков для здоровья населения.

### Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Источники финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

### Литература

- Onishchenko A., Malinovsky G., Vasilyev A., Zhukovskiy M. Radon measurements in kindergartens in Ural region (Russia) // *Radiation Protection Dosimetry*. 2017. Vol. 177, No 1-2. P. 112–115.
- Историк О.А., Еремина Л.А. К вопросу оценки уровней облучения природными источниками ионизирующего излучения детей в образовательных учреждениях Ленинградской области // *Медицина: теория и практика*. 2019. Т.4, Спецвыпуск. С. 235–236.
- Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Результаты выборочного исследования содержания радона в помещениях детских дошкольных и школьных организаций Ленинградской области // *Здоровье населения и среда обитания*. 2017. № 10 (295). С. 46–49.
- Кормановская Т.А., Историк О.А., Романович И.К., и др. Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений зданий детских учреждений // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 2. С. 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
- Павленко Т.А., Костенецкий М.И., Куцак А.В., и др. Уровни облучения дошкольников за счет радона в воздухе помещений // *Гигиена и санитария*. 2015. Т. 94, №4. С. 18–21.
- Ibrayeva D.S., Aumalikova M.N., Ilbekova K.B., et al. Determination of radon levels in dwellings and social objects and evaluation annual effective dose from inhalation of radon in Stepnogorsk area Northern Kazakhstan // *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. 2020. Vol. 4, No 4. P. 344–350. DOI:10.29317/ejpfm.2020040408.
- Муминов С.В., Баротов Б.Б., Махмудова М.М., и др. Изучение уровней содержания радона в зданиях дошкольных и школьных учреждений г. Душанбе Республики Таджикистан // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 1. С. 124–132. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-124-132.
- Bochicchio F., Zunic Z.S., Carpentieri C., et al. Radon in indoor air of primary schools: a systematic survey to evaluate factors affecting radon concentration levels and their variability // *Indoor air*. 2014. Vol. 24, No 3. P. 315–326.
- Ivanova K., Stojanovska Z., Tsenova M., et al. Measurement of indoor radon concentration in kindergartens in Sofia, Bulgaria // *Radiation protection dosimetry*. 2014. Vol. 162, No 1-2. P. 163–166. DOI: 10.1093/rpd/ncu251.
- Kojo K., Kurttio P. Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools—Enforcement of the Radiation Act // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, No 8. P. 2877. DOI:10.3390/ijerph17082877.
- EPA. Radon Measurements in Schools. Revised Edition, 1993. 44 p.
- Официальный сайт Агентства по охране окружающей среды США. URL: <http://www.epa.gov/radon/radon-schools#testing/> (дата обращения: 01.02.2023).
- Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay products in Schools and Large Buildings. URL: <http://standards.aarst.org/MALB-2014/index.html> (дата обращения: 01.02.2023).
- Radon Mitigation Standards for Schools and Large Buildings. URL: <http://standards.aarst.org/RMS-LB-2018/index.html> (дата обращения: 01.02.2023).
- George A.C. The history, development and the present status of the radon measurement programme in the United States of America // *Radiation Protection Dosimetry*. 2015. Vol. 167, No 1-3. P. 8–14. DOI: 10.1093/rpd/ncv213
- Tsapalov A., Kovler K. Studying temporal variations of indoor radon as a vital step towards rational and harmonized international regulation // *Environmental Challenges*. 2021. Vol. 4. P. 100204. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100204.
- ISO 11665-4. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis. Genève: International Organization for Standardization, 2012.
- Protocol for radon measurements in schools and kindergartens. The Norwegian Radiation Protection Authority (NRP), 2015. 21 p. URL: <https://dsa.no/en/radon/radon-in-schools-and-kindergartens> (дата обращения: 01.02.2023).
- ISO 11665-1. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 1: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods. Genève: International Organization for Standardization, 2012.
- ISO 11665-5. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 5: Continuous measurement method of the activity concentration. Genève: International Organization for Standardization, 2012.
- Turtiainen T., Kojo K., Laine J-P., et al. Improving the assessment of occupational exposure to radon in above-ground workplaces // *Radiation Protection Dosimetry*. 2021. Vol. 196, No 1-2. P. 44–52. DOI: 10.1093/rpd/ncab127.
- Васильев А.С., Романович И.К., Кормановская Т.А., и др. Сравнительная оценка доз облучения и радиационных

- рисков у обучающихся и сотрудников некоторых детских учреждений Ленинградской области в зависимости от методов и подходов к измерению содержания радона в воздухе помещений // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 6–18. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-6-18.
23. Горбаткова Е.Ю. Гигиеническая оценка условий обучения (на примере высших учебных заведений Уфы) // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99, № 4. С. 405–411. DOI: 10.33029/0016-9900-2020-99-4-405-411.
  24. Историк О.А., Еремина Л.А., Кормановская Т.А., и др. Уровни содержания радона в воздухе помещений детских учреждений Волосовского района Ленинградской области // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы международной научно-практической конференции. СПб, 2018. С. 132–135.
  25. Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В., и др. Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 29–40. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.
  26. Онищенко А.Д., Васильев А.В., Малиновский Г.П., Жуковский М.В. Влияние строительных характеристик зданий на накопление радона в детских дошкольных учреждениях Свердловской области // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 28–36. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-28-36.
  27. Маренный А.М., Кононенко Д.В., Труфанова А.Е. Радонное обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариативности объемной активности радона // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 51–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67.
  28. Fojtikova I., Navratilova Rovenska K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic // Radiation protection dosimetry. 2014. Vol. 160, No 1-3. P. 149–153.
  29. Цапалов А.А., Кувшинников С.И. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха // АНРИ. 2008. № 2 (53). С. 37–43.
  30. Цапалов А.А., Ермилов А.П., Гулабянц Л.А., и др. Принцип оценки среднегодовой ЭРОА радона в зданиях по результатам краткосрочных измерений // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 23–27.
  31. Онищенко А.Д., Васильев А.В., Малиновский Г.П., Жуковский М.В. Влияние строительных характеристик зданий на накопление радона в детских дошкольных учреждениях Свердловской области // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 28–36. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-28-36.
  32. Rydock J., Næss-Rolstad A., Brunzell J. Diurnal variations in radon concentrations in a school and office // Atmospheric Environment. 2001. Vol. 35 (16). P. 2921–2926. DOI: 10.1016/S1352-2310(00)00515-X.

Поступила: 19.04.2023 г.

**Васильев Алексей Серафимович** – аспирант, исполняющий обязанности младшего научного сотрудника лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: a.vasilev@niirg.ru  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1277-3807>

**Для цитирования:** Васильев А.С. Облучение обучающихся и сотрудников детских учреждений Ленинградской области природными источниками излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 65–77. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77

## Exposure of students (pupils) and employees of educational institutions in the Leningrad region to natural sources of radiation Part 1: Results of a comprehensive survey

Alexey S. Vasilyev

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

*Currently, there is no methodological support for radiation monitoring and sanitary and epidemiological assessment of radon concentration (or radon EEC) and other parameters of the radiation situation in existing operated buildings. The paper presents a review of the protocols for conducting measurements of indoor*

**Alexey S. Vasilyev**

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

**Address for correspondence:** Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russian Federation. E-mail: a.vasilev@niirg.ru

radon concentration in educational institutions in some foreign countries (USA, Norway, Finland), and also presents results of a comprehensive radiation survey of nine educational institutions in five settlements of the Leningrad region with previously found elevated levels of radon concentration using long-term measurements. The survey revealed that highest values of indoor radon ECC were obtained using instant measurements in several educational institutions both in the normal operation mode of the buildings (up to 1106 Bq/m<sup>3</sup>) and after leaving the premises for 12 hours with closed windows and doors (up to 1586 Bq/m<sup>3</sup>) according to the requirements of paragraph 6.5 of MU 2.6.1.2838-11. High values of radon concentration were also obtained using long-term and short-term measurements (up to 4900 and 1420 Bq/m<sup>3</sup>, respectively). In addition, high values of radon flux density were detected (up to 2030 mBq/(m<sup>2</sup>·s)). The established hygienic norms for ambient dose equivalent rate indoors and outdoors were not exceeded in the surveyed educational institutions. The levels of gross alpha- and beta activities in tap water sampled from the surveyed educational institutions were below the control levels, and an exceedance of intervention level for activity concentration of radon in analyzed samples was not detected. The results of the survey will be used for hygienic assessment of doses and health risks for students (pupils) and employees of several educational institutions of the Leningrad region due to exposure to radon and its progeny and can be used to improve the method for indoor radon concentration monitoring in existing operated public buildings in the Russian Federation, which in turn will make it possible to obtain correct values of public doses and health risks.

**Key words:** radon, progeny, instant measurements, long-term measurements, short-term measurements, public building, educational institution.

### Information on the conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Sources of funding

The study had no sponsorship.

### References

- Onishchenko A, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Radon measurements in kindergartens in Ural region (Russia). *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;177(1-2): 112–115.
- Istoriik OA, Eremina LA. On the issue of assessing the levels of exposure to natural sources of ionizing radiation of children in educational institutions of the Leningrad region. *Meditsina: teoriya i praktika = Medicine: theory and practice*. 2019;4(Special Issue): 235–236. (In Russian).
- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Balabina TA, Koroleva NA, Istoriik OA, et al. Results of sampling analysis of radon content in preschool and school organizations of the Leningrad region. *Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment*. 2017;10(295): 46–49. (In Russian).
- Kormanovskaya TA, Istoriik OA, Romanovich IK, Eremina LA, Koroleva NA, Balabina TA, et al. Radon surveys in the buildings of children institutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20. (In Russian).
- Pavlenko TA, Kostenetsky MI, Kutsak AV, Sevalnev AI, Aksenov NV, Fryziuk MA. Irradiation levels for preschool children due to indoor radon. *Gigiena i Sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2015; 94(4): 18–21. (In Russian).
- Ibrayeva DS, Aumalikova MN, Ilbekova KB, Bakhtin MM, Kazymbet PK. Determination of radon levels in dwellings and social objects and evaluation annual effective dose from inhalation of radon in Stepnogorsk area Northern Kazakhstan. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. 2020;4(4): 344–350. DOI:10.29317/ejpfm.2020040408.
- Muminov SV, Barotov BB, Makhmudova MM, Khamidov FA, Akhmedov MZ, Mirsaidov UM. Radon survey in kindergartens and schools of Dushanbe, Republic of Tajikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 124–132. DOI:10.21514/1998-426X-2021-14-1-124-132. (In Russian).
- Bochicchio F, Zunic ZS, Carpentieri C, Antignani S, Venoso G, Carelli V, et al. Radon in indoor air of primary schools: a systematic survey to evaluate factors affecting radon concentration levels and their variability. *Indoor air*. 2014;24(3): 315–326.
- Ivanova K, Stojanovska Z, Tsenova M, Badulin V, Kunovska B. Measurement of indoor radon concentration in kindergartens in Sofia, Bulgaria. *Radiation protection dosimetry*. 2014;162(1-2): 163–166. DOI: 10.1093/rpd/ncu251.
- Kojo K, Kurttio P. Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools—Enforcement of the Radiation Act. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(8): 2877. DOI:10.3390/ijerph17082877.
- EPA. Radon Measurements in Schools. Revised Edition; 1993. 44 p.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). Available from: <http://www.epa.gov/radon/radon-schools#testing/> [Accessed 01 Feb 2023].
- Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay products in Schools and Large Buildings. Available from: <http://standards.aarst.org/MALB-2014/index.html> [Accessed 01 Feb 2023].
- Radon Mitigation Standards for Schools and Large Buildings. Available from: <http://standards.aarst.org/RMS-LB-2018/index.html> [Accessed 01 Feb 2023].
- George AC. The history, development and the present status of the radon measurement programme in the United States of America. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;167(1-3): 8–14. DOI: 10.1093/rpd/ncv213.
- Tsapalov A, Kovler K. Studying temporal variations of indoor radon as a vital step towards rational and harmonized international regulation. *Environmental Challenges*. 2021;4: 100204. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100204.
- ISO 11665-4. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis. Geneva: International Organization for Standardization; 2012.
- Protocol for radon measurements in schools and kindergartens. The Norwegian Radiation Protection Authority (NRPA); 2015. 21 p. Available from: <https://dsa.no/en/radon/radon-in-schools-and-kindergartens> [Accessed 01 Feb 2023].
- ISO 11665-1. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 1: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods. Geneva: International Organization for Standardization; 2012.
- ISO 11665-5. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 5: Continuous measurement

- method of the activity concentration. Gen ve: International Organization for Standardization; 2012.
21. Turtiainen T, Kojo K, Laine J-P, Holmgren O, Kurttio P. Improving the assessment of occupational exposure to radon in above-ground workplaces. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;196(1-2): 44–52. DOI: 10.1093/rpd/ncab127.
  22. Vasilyev AS, Romanovich IK, Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Istorik OA, Eremina LA. Comparative assessment of doses and health risks for students (pupils) and employees of several educational institutions in the Leningrad region, depending on methods and approaches to measuring indoor radon concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022; 15(2): 6–18. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-6-18. (In Russian).
  23. Gorbatkova EJ. Hygienic assessment of learning environment conditions (by the example of higher educational institutions of the city of Ufa). *Gigiena i Sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2020;99(4): 405-411. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-4-405-411. (In Russian).
  24. Istorik OA, Eremina LA, Kormanovskaya TA, Koroleva NA, Balabina TA. Levels of indoor radon concentration of the premises of children's institutions of the Volosovsky district of the Leningrad region. Actual issues of radiation hygiene: Materials of the international scientific and practical conference. Saint-Petersburg; 2018. P. 132-135. (In Russian).
  25. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40. (In Russian).
  26. Onishchenko AD, Vasilyev AV, Malinovsky GP, Zhukovsky MV. Influence of building features on radon accumulation in kindergartens of the Sverdlovsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 28-36. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-28-36. (In Russian).
  27. Marennyy AM, Kononenko DV, Trufanova AE. Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor radon concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 51-67. DOI:10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67. (In Russian).
  28. Fojtikova I, Navratilova Rovenska K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic. *Radiation protection dosimetry*. 2014;160(1-3): 149-153.
  29. Tsapalov AA, Kuvshinnikov SI. Dependence of indoor radon in the premises on the difference between internal and external air temperatures. *Association of science editors and publishers*. 2008;2(53): 37–43. (In Russian)
  30. Tsapalov AA, Ermilov AP, Gulabyan LA, Gubin AT, Kuvshinnikov SI. Principle of estimation annual radon EEC in building by results of short-term measurements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(3): 23-27. (In Russian).
  31. Onishchenko AD, Vasilyev AV, Malinovsky GP, Zhukovsky MV. Influence of building features on radon accumulation in kindergartens of the Sverdlovsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 28-36. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-28-36. (In Russian).
  32. Rydock J, N ss-Rolstad A, Brunzell J. Diurnal variations in radon concentrations in a school and office. *Atmospheric Environment*. 2001;35(16): 2921–2926. DOI:10.1016/s1352-2310(00)00515-x.

Received: April 19, 2023

**For correspondence: Alexey S. Vasilyev** – Postgraduate student, acting junior researcher, Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: a.vasilev@niirg.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1277-3807>

**For citation: Vasilyev A.S. Exposure of students (pupils) and employees of educational institutions in the Leningrad region to natural sources of radiation. Part 1: Results of a comprehensive survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 65-77. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77**

## Оценка поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г.

В.В. Востротин, Л.В. Финашов

Южно-Уральский институт биофизики, Озёрск, Челябинская область, Россия

Целью исследования являлось определение уровня годового поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г. и соответствие содержания трития в воздухе прибрежной зоны озера Кызылташ нормам радиационной безопасности. В мае – сентябре 2021 г. было проведено исследование прибрежных растений вблизи озера Кызылташ, являющегося технологическим водоёмом производственного объединения «Маяк». На расстоянии до 100 м от берега влажность растений находилась в диапазоне 41–87%, уровень объёмной активности трития в воде растений и транспирационной воде – от 96 Бк/л до ~8,0 кБк/л и от 64 Бк/л до ~9,0 кБк/л соответственно. По шкале Чеддока обнаружены ранговые корреляции между объёмной активностью трития и: временем от начала вегетационного периода (слабая обратная); расстоянием от берега (замечная обратная); влажностью растений (умеренная положительная). Для прогнозирования поступления трития в воздух в форме НТО в поствегетационный период были построены модели экспоненциального убывания влажности и объёмной активности трития в растениях в зависимости времени. Оценки общих периодов полураспада влажности и объёмной активности трития в воде растений составили 262 и 64 сут соответственно. Суммарное годовое поступление НТО в воздух в 2021 г. от прибрежных растений составило  $6,92E+11$  Бк, со вкладом 0,35% от годового поступления трития с поверхности озера Кызылташ. Растения зоны 0...~5 м дают 81,8% от суммарного годового поступления от прибрежных растений озера Кызылташ ( $5,66E+11$  Бк). Годовое поступление НТО только от растений береговой линии озера Кызылташ (0...~5 м), равное ( $5,66E+11$  Бк), было сопоставимо с выбросами трития в 2021 г. от Курской АЭС ( $5,32 E+11$  Бк), а поступление трития от всех прибрежных растений озера Кызылташ – с выбросами Ленинградской АЭС ( $6,90E+11$  Бк). Средняя объёмная активность НТО в воздухе прибрежной зоны озера Кызылташ в ходе 2 экспедиций при отсутствии осадков составляла ~60 Бк/м<sup>3</sup>, что в ~30 раз меньше допустимой объёмной активности трития во вдыхаемом воздухе для населения, равной  $1,9E+3$  Бк/м<sup>3</sup> согласно НРБ-99/2009. В случае гипотетического проживания на берегу озера Кызылташ в 2021 г. и постоянного уровня объёмной активности трития в объектах окружающей среды годовая ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения, обусловленная ингаляцией паров сверхтяжёлой воды, согласно НРБ-99/2009, для стандартных условий составит 31 мкЗв/год для критической группы детей возраста 1–2 года и 8,7 мкЗв/год для взрослого населения. Данные оценки являются консервативными, так как не учитывают ледоставный период, в течение которого испарение воды с поверхности озера Кызылташ и поступление из растений практически отсутствует.

**Ключевые слова:** тритий, растения, береговая линия, транспирация, воздух, озеро Кызылташ, производственное объединение «Маяк».

### Введение

Тритий отнесен к числу 7 наиболее опасных радионуклидов, являясь радиоактивным изотопом водорода, обладает высокой миграционной способностью и быстрым включением в обменные процессы и структуры окружающей среды, мгновенно поступая во все звенья экологического кругооборота, замещая водород и обуславливая разрывы в цепочках РНК и ДНК в биологических

структурах всех живых организмов [1]. Очистка выбросов и сбросов от трития, образующегося в процессе эксплуатации предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики, является методически сложной задачей [2]. Тритий оказывает радиационное воздействие на население и окружающую среду и включён в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования<sup>1</sup> [3].

<sup>1</sup> Постановление правительства РФ № 1316-п от 08.07.2015 г. (с изменениями на 10 мая 2019 г.) [Decree of the Government of the Russian Federation no. 1316-r of 08.07.2015 (as amended as of May 10, 2019) (In Russ.)]

**Востротин Вадим Владимирович**

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, г. Озёрск, ш. Озёрское, 19; e-mail: vostrotin@subi.su

При нормальной эксплуатации международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) прогнозируемая максимальная масса трития во всей установке в 2025 г. составит 4 кг (~ 1,4E+18 Бк). При этом оценка поступления трития в окружающую среду, в основном в виде паров сверхтяжелой воды (НТО или T2O), будет равна приблизительно 2,5 г/год (~ 1,3E+14 Бк/год для НТО) в годы интенсивного обслуживания и 0,6 г/год (~3,2E+13 Бк/год для НТО) при штатной работе реактора. Для работы коммерческого термоядерного реактора будет необходимо ежегодно 55,8 кг трития на 1000 МВт мощности, что потребует увеличения производства трития по всему миру [4].

Исследования, направленные на изучение путей миграции трития в системе вода – воздух – почва – растения вблизи предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики, позволяют прогнозировать в будущем радиологическую обстановку рядом с объектами термоядерной энергетики. Существующие модели распределения трития в окружающей среде имеют свои ограничения, так как многие параметры этих моделей получены экспериментально при периоде наблюдения менее 1 года [5, 6].

Озеро Кызылташ (Водоем В-2) является открытым хранилищем естественного происхождения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) производственного объединения (ПО) «Маяк» и находится внутри его санитарно-защитной зоны (СЗЗ). В 2021 г. объёмная активность (ОА) трития в воде озера составляла ~16 кБк/л, что привело в процессе испарения к поступлению 1,96E+14 Бк в воздух с поверхности, сопоставимому как с выбросами трития от всех предприятий РФ, кроме ПО «Маяк» (1,79E+14 Бк), так и с прогнозным уровнем поступления трития в окружающую среду в годы интенсивного обслуживания термоядерного реактора ITER [4, 7]. Водоем В-2 весь свой период эксплуатации, начиная с 1946 г., как водоём-охладитель являлся основным источником поступления воды с высоким содержанием трития в окружающую среду [8]. Растения, находящиеся вблизи данного водоёма, длительный период времени абсорбировали тритий в форме НТО, как через корневую систему, так и через воздух. Таким образом, вблизи озера Кызылташ сформировалась экосистема, с 1946 г. подвергавшаяся воздействию трития.

Транспирация является важным механизмом регуляции водно-солевого обмена растения с окружающей средой, который создает автоматичность водного тока: поступление воды в растение и её испарение [9]. В ходе вегетационного периода прибрежные растения озера Кызылташ за счёт транспирации активно испаряли воду, что приводило к увеличению поступления НТО в воздух и усилению воздействия ПО «Маяк» на окружающую среду.

Таким образом, оценка уровня годового поступления трития в форме НТО в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в современных условиях является актуальным исследованием, как с точки зрения радиационной гигиены, так и с точки зрения получения новых данных о миграции трития в системе вода – растения – воздух.

**Цель исследования** – определение уровня годового поступления трития в форме НТО в воздух от

прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г. и соответствие содержания трития в воздухе прибрежной зоны озера Кызылташ нормам радиационной безопасности.

### Материалы и методы

Для достижения цели исследования были выполнены следующие задачи:

1. Определение зависимостей от расстояния до береговой линии и времени вегетационного периода следующих параметров прибрежных растений озера Кызылташ:
  - а) влажности;
  - б) ОА НТО внутриклеточной воды (ВВ);
  - в) ОА НТО в транспирационной воде (ТВ).
2. Расчёт площади прибрежных растений озера Кызылташ.
3. Создание методики оценки поступления НТО в воздух от прибрежных растений.
4. Измерение ОА НТО в воздухе прибрежной зоны озера Кызылташ.

Для достижения цели исследования была разработана программа радиологического стационарного сезонного исследования внутри СЗЗ ПО «Маяк», проведённого вблизи озера Кызылташ в районе «Метеостанции» (рис. 1).

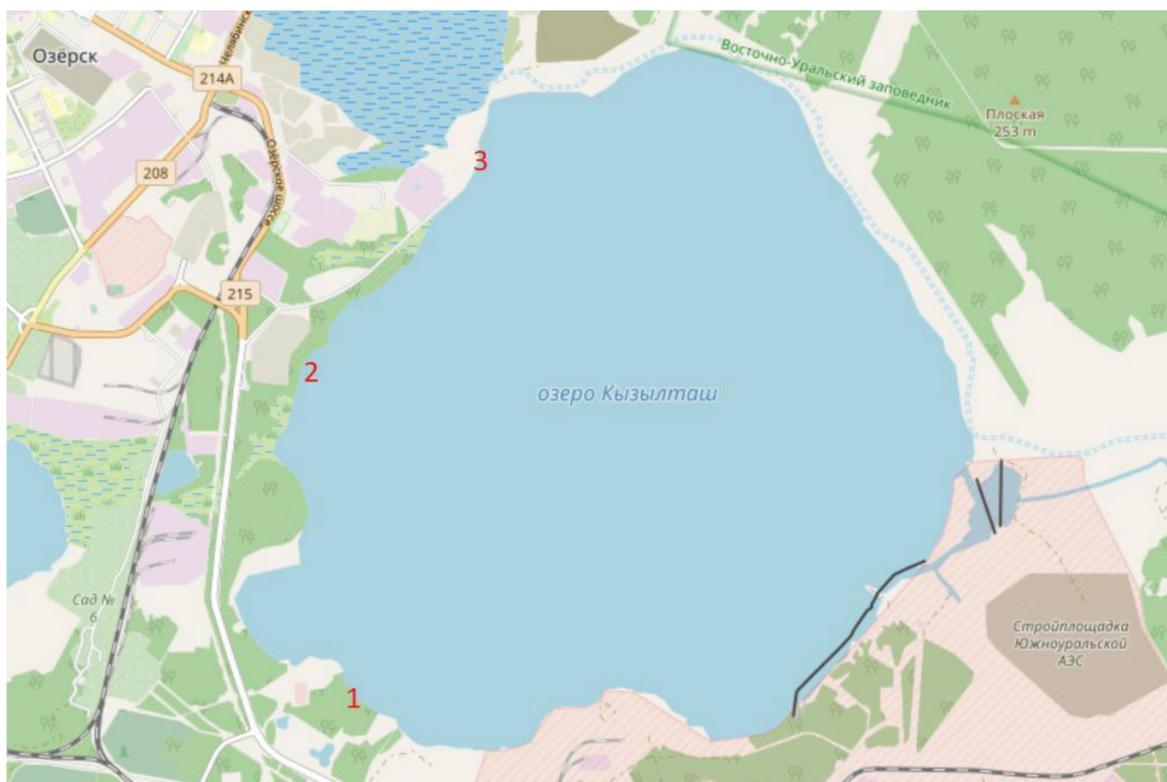
Предполагалось, что вегетационный период растений прибрежной зоны озера Кызылташ в 2021 г., начавшийся 1 мая и закончившийся 13 октября, был продолжительностью 166 сут.

На основе программы полевого радиологического исследования было организовано 5 экспедиций (17.06.2021 г. – 48 сут от начала вегетационного периода; 01.07.2021 г. – 62 сут; 15.07.2021 г. – 77 сут; 19.08.2021 г. – 113 сут; 02.09.2021 г. – 127 сут), в ходе которых у береговой линии (0...~5м) и на расстояниях 10, 50 и 100 м от береговой линии: в течение 1 ч собирались пробы травы и листьев (всего 40 проб), а в течение от 1 до 5 сут – пробы транспирационной воды берёз (всего 20 проб).

В 3 экспедициях (17.06.2021 г., 01.07.2021 г., 02.09.2021 г.) отбирался конденсат воздуха в точках, обозначенных на рисунке 1 как «Гаражи» (номер 2) – 100 м от береговой линии озера Кызылташ и «Полигон» (номер 3) – непосредственно на берегу и в 20 м от берега с одновременным измерением температуры, влажности и давления. Время пробоотбора составляло ~10...20 мин, время перемещения между точками отбора – ~15 мин. Выбор точек сбора конденсата воздуха был продиктован возможностью транспортировки промышленного осушителя воздуха с размером 580 мм × 600 мм × 1035 мм и массой 66 кг, а также возможностью подключения его к источнику мобильного электрогенератора.

#### *Лесной массив санитарно-защитной зоны озера Кызылташ*

Лесной массив вблизи озера Кызылташ являлся смешанным лесом и был представлен широколиственными и хвойными породами деревьев. Деревья в основном были представлены берёзой повислой (*Betula pendula Roth.*) и осинкой обыкновенной (*Populus tremula L.*), хвойные в основном представлены сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*).



**Рис. 1.** Места отбора проб оз. Кызылташ в 2021 г. с использованием данных сайта [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org). Отмечены номерами 1 («Метеостанция»), 2 («Гаражи») и 3 («Полигон») [Fig. 1. A place of sampling from Lake Kyzyltash in 2021 based on the data from the site [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org). “Meteorological station” is marked with 1, “garage” – 2 and “teste site” – 3]

#### *Травяной напочвенный покров санитарно-защитной зоны озера Кызылташ*

При осуществлении стационарного радиоэкологического исследования было выявлено, что есть 2 фитоценоза. Первый фитоценоз береговой линии (0 до ~ 10 м от озера Кызылташ) представлял собой разнотравно-злаковый луг с заметным участием мезофильного и гигро-мезофильного разнотравья.

Второй травяной фитоценоз располагался на расстоянии от ~ 10 до 100 м от береговой линии озера Кызылташ. В основном, он был представлен полидоминантным низкотравным разнотравно-злаковым лугом с преобладанием многолетних злаковых, зарослями кустарников и отдельными деревьями.

#### *Подготовка проб транспирационной воды листьев берёзы и изготовление счетных образцов*

На каждом из участков отбирались пробы не менее чем от 5 деревьев. На ветки берёзы с листвой надевали полиэтиленовый пакет типа ZipLock с внешней площадью одной стороны 0,05 м<sup>2</sup>. Через 1...5 сут составляли объединённую пробу с каждого из участков. Объём объединённой пробы ТВ измеряли весовым методом с помощью весов ВЛ-124 при предполагаемой плотности 1,0 кг/л. Уровень ОА НТО в

объединённой пробе ТВ определялся в соответствии с МИ (Методика выполнения измерения объёмной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220)<sup>2</sup>.

#### *Подготовка проб травы, листьев берёзы и изготовление счетных образцов*

Сбор травы осуществлялся у береговой линии и на расстояниях 10, 50 и 100 м от береговой линии на одном расстоянии от уреза воды. Собранные образцы травы смешивались, образуя объединённую пробу. Сбор проб листьев берёзы осуществлялся не менее чем от 5 деревьев, растущих на одинаковом расстоянии от уреза воды, образуя объединённую пробу.

С целью определения ОА НТО в ВВ растений и листьев берёзы часть сырой, объединённой пробы помещалась в стеклянные герметичные ёмкости вместимостью 1 л с притёртой крышкой, в которые предварительно насыпалось 100 г силикагеля КСМГ ГОСТ 3956-76, прокалённого в сушильном шкафу ШСЛ-43.250 в течение 3 ч при температуре 150°C. Между силикагелем и пробой укладывалась фильтровальная бумага. Ёмкости ставились в тёмное помещение на 3 сут при комнатной температуре для адсорбции воды из растительного материала. Через 3 сут

<sup>2</sup> Методика выполнения измерений объёмной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220. ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики». Озёрск, 2016), свидетельство об аттестации МИ No 222.0032/RA.RU.311866/2019 [Methods for measuring the volume activity of tritium in water and urine samples using a Quantulus-1220 liquid scintillation spectrometer; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozersk, 2016.), certificate of certification No. 222.0032 / RA.RU.311866 / 2019 (In Russ.)].

растительный материал извлекался из ёмкости, силикагель засыпался в круглодонную колбу вместимостью 0,5 л. Колба помещалась в колбонагреватель для испарения воды из силикагеля. Уровень ОА НТО в полученной пробе воды из растений определялся в соответствии с МИ<sup>2</sup>.

Для определения влажности объединённой пробы растительного материала измерялась начальная масса сырой пробы с помощью весов ВК 3000.1. Затем проба высушивалась в течение 7–10 дней в закрытом помещении при комнатной температуре ~25...30°C в режиме микропродувания, с последующим досушиванием в бытовой сушке в течение 3–12 ч. Проводилось измерение массы сухой объединённой пробы растительного материала. Оценка влажности объединённой пробы растительного материала определялась согласно ОФС.1.5.3.0007.15 (Определение влажности лекарственного растительного сырья)<sup>3</sup>. Оценка влажности объединённой пробы растительного материала  $W, \%$  была равна:

$$W = \frac{(m_w - m_d) * 100}{m_w}, \% \quad (1)$$

где:

$m_w$  – масса сырой пробы, г;

$m_d$  – масса воздушно-сухой пробы, г.

#### *Подготовка проб воздуха и изготовление счетных образцов*

С целью измерения ОА НТО в воздухе отбирался конденсат воздуха в 2 точки, обозначенных на рисунке 1 «Гаражи» (номер 2) 100 м от береговой линии озера Кызылташ и «Полигон» (номер 3) непосредственно на берегу и в 20 м от берега с одновременным измерением температуры, влажности и давления.

Отбор проб воздуха производился с помощью промышленного осушителя воздуха «MASTER DH 92 Dehumidifier», позволяющего конденсировать не менее 20 см<sup>3</sup> воды из воздуха в течение 1 ч. Время отбора пробы воздуха составляло ~10...20 мин. Полученная проба конденсата воды переливалась в стеклянную банку вместимостью 50...100 см<sup>3</sup>, снабжённую этикеткой, с плотно закрывающимися крышками. На этикетку банки наносилась следующая информация: место размещения промышленного осушителя воздуха; дата и время отбора пробы; результат измерения температуры воздуха, °C; результат измерения относительной влажности воздуха, %; результат измерения атмосферного давления, мм рт. ст. Измерение температуры, влажности и давления воздуха производилось с помощью термогигрометра ИВТМ-7М со встроенным датчиком атмосферного давления.

Уровень ОА НТО в пробе воды конденсата воздуха определялся в соответствии с МИ<sup>2</sup>.

Значение ОА НТО в воздухе определяли на основе абсолютной влажности воздуха, рассчитываемой по уравнению Менделеева – Клапейрона для идеальных газов с использованием оценки насыщенного давления водяного пара воздуха для диапазона от -45°C до 60°C из

Руководства по метеорологическим приборам и методам наблюдений [10].

#### *Расчёт площади исследованной зоны вокруг озера Кызылташ и площади крон деревьев*

Для расчёта площади исследованных зон вокруг озера Кызылташ и площади крон деревьев, произрастающих на них, использовались спутниковые снимки высокого разрешения, предоставляемые сервисом Google Earth<sup>4</sup>. Была использована дата снимка района озера Кызылташ от 12.06.2021 г. Вся изучаемая область санитарно-защитной зоны озера Кызылташ была разделена на 21 район. Встроенный в Google Earth сервис расчёта площади использовался следующим образом. С использованием встроенной координатной сетки были установлены маркеры по береговой линии озера Кызылташ, ~5 м и от ~5 до 100 м от береговой линии. На основании установленных маркеров измерялась площадь крон деревьев, произрастающих в данных районах на удалении ~5 м и от ~5 до 100 м от береговой линии.

#### *Статистическая обработка данных*

Для построения графиков и статистической обработки данных использовалась офисная программа Microsoft Excel и статистический пакет R версии 4.0.2 «Taking Off Again». Уровень статистической значимости был принят равным 5%.

#### *Методика оценки уровня поступления трития в воздух в форме паров НТО от прибрежных растений озера Кызылташ*

Для оценки уровня годового поступления НТО в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ были приняты следующие допущения:

1. Травяной напочвенный покров равномерно покрывал площадь зоны от 0 до ~5 м озера Кызылташ и площадь зоны от ~5 до 100 м от береговой линии. Соответственно, площадь поверхности травы равна площади почвы одной из зон, умноженной на индекс листовой поверхности.
2. Вегетационный период в 2021 г., начавшийся 1 мая и закончившийся 13 октября, продолжался 166 сут.
3. В поствегетационный период из опавших листьев и отмерших надземных частей растений в процессе суточных колебаний температур (циклы заморозка, оттаивания), вся ВВ, содержащая тритий, выходит из разрушенных клеток и испаряется, поступая в окружающую среду.
4. Масса отмерших надземных частей растений (травы) площадью 1 м<sup>2</sup> равна 1,5 кг [11].
5. Масса опавших листьев площадью 1 м<sup>2</sup> равна 0,1 кг [12].
6. Интенсивность транспирации растений, по литературным данным, с площади поверхности 1 м<sup>2</sup> составляет 15...250 г днём и 1...20 г ночью [9]. При равномерных зонах распределения указанных величин и плотности ТВ 1 кг/л средневзвешенная интенсивность транспирации растений равна 0,143±0,068 л/(м<sup>2</sup>·сут), со стандартной относительной неопределённостью 48%.

<sup>3</sup> Общая фармакопейная статья 1.5.3.0007.15 Определение влажности лекарственного растительного сырья [General monograph 1.5.3.0007.15 Determination of moisture of medicinal plant raw material. (In Russ.)] <http://pharmacopoeia.ru/wp-content/uploads/2016/08/OFS.1.5.3.0007.15-Opredelenie-vlazhnosti-lekarstvennogo-rastitelnogo-syrya.pdf>

<sup>4</sup> Сайт <https://earth.google.com/web/@55.72037356,60.7361111,226.02947874a,289.03866329d,35y,0h,0t,0r> (Дата обращения 14.10.2021)

7. Индекс листовой поверхности, по литературным данным, в среднем для лесов России равен 5,5 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> как для травы, так и для листьев деревьев [13].

8. Плотность ВВ равна 1 кг/л.

9. Весь лесной массив СЗЗ озера Кызылташ представлен листопадными деревьями.

10. В поствегетационный период транспирация полностью прекращается.

Уровень годового поступления трития в воздух в форме НТО от прибрежных растений озера Кызылташ оценивался как сумма 2 поступлений в вегетационный  $A_{тра}^{раст}$  и поствегетационный  $A_{пост}^{раст}$  периоды, выраженных в Бк.

Оценка активности НТО, поступающего в процессе транспирации в течение вегетационного периода 2021 г. от травы и через листья деревьев, произрастающих вокруг озера Кызылташ, была равна:

$$A_{тра}^{раст} = A_{тра}^{тp} + A_{тра}^д = T \times L \times V \times \left( \sum_{i=1,2} S_i \cdot \gamma_{i,тp} \cdot k_{i,тp} + S_{i,д} \cdot \gamma_{i,д} \right), \quad (2)$$

где:

$A_{тра}^{тp}$  – активность НТО, поступившего в процессе транспирации в течение вегетационного периода 2021 г. от травы, произрастающей в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк;

$A_{тра}^д$  – активность НТО, поступившего в процессе транспирации в течение вегетационного периода 2021 г. от деревьев, произрастающих в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк;

$T$  – время вегетационного периода 2021 г., сут;

$i=1,2$  – индекс зоны на удалении 0...~5 и ~5...100 м от береговой линии озера Кызылташ;

$S_i$  – площадь почвы в  $i$ -й зоне озера Кызылташ, м<sup>2</sup>;

$V$  – интенсивность транспирации, л/(м<sup>2</sup>·сут);

$L$  – индекс листовой поверхности, м<sup>2</sup>/ м<sup>2</sup>;

$\gamma_{i,тp}$  – оценка ОА НТО ВВ проб травы в  $i$ -й зоне озера Кызылташ, Бк/л;

$k_{i,тp}$  – коэффициент перехода от ОА НТО ВВ проб травы в  $i$ -й зоне озера Кызылташ к ОА НТО транспирационной воды травы ( $k_{1,тp} = 3,25$ ;  $k_{2,тp} = 1,34$ , см. ниже в разделе «Результаты и обсуждение»);

$S_{i,д}$  – площадь кроны деревьев в  $i$ -й зоне озера Кызылташ, м<sup>2</sup>;

$\gamma_{i,д}$  – оценка ОА НТО ТВ листьев березы в  $i$ -й зоне озера Кызылташ, Бк/л.

Оценка активности НТО, поступившего в воздух в поствегетационный период с отмершими надземными частями травы и листьями деревьев, произрастающих вокруг озера Кызылташ, была равна:

$$A_{пост}^{раст} = A_{пост}^{трава} + A_{пост}^{лист} = L \sum_{i=1,2} \frac{VA(t)_i}{\rho_{воды}} \sum_{j=1,2} S_{i,j} \cdot \mu_{i,j} \cdot \left( \frac{RH(t)_{i,j}}{100} \right), \quad (3)$$

где:

$A_{пост}^{трава}$  – активность НТО, поступившего в воздух в поствегетационном периоде 2021 г. с отмершими надземными частями травы, произрастающей в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк;

$A_{пост}^{лист}$  – активность НТО, поступившего в воздух в поствегетационном периоде 2021 г. с опавшими листьями деревьев, произрастающих в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк;

$i=1,2$  – индекс зоны на удалении 0...~5 и ~5...100 м от береговой линии озера Кызылташ;

$j=1,2$  – индекс отмерших частей растений листьев крон деревьев ( $j=1$ ) и травы ( $j=2$ );

$S_{i,j}$  – площадь почвы, занимаемой частями отмерших  $j$ -х растений в  $i$ -й зоне, м<sup>2</sup>;

$L$  – индекс листовой поверхности, м<sup>2</sup>/ м<sup>2</sup>;

$\mu_{i,j}$  – средняя масса опавших  $j$ -х отмерших частей растений в  $i$ -й зоне на единицу площади, кг/м<sup>2</sup>;

$t$  – время с даты начала вегетационного периода, сут;

$RH(t)_{i,j}$  – модельное значение влажности проб  $j$ -х отмерших частей растений в  $i$ -й зоне в конце вегетационного периода наблюдения 13.10.2021 г., по регрессионным моделям по формуле 4 (на дату 13.10.2021 г., равную 166 сут от начала отсчёта), %;

100 – коэффициент перехода от доли к процентам, %;

$VA(t)_i$  – модельная ОА НТО ВВ проб отмерших частей растений в  $i$ -й зоне в конце вегетационного периода наблюдения 13.10.2021 г., по регрессионным моделям по формуле 5 (дата 13.10.2021 равна 166 сут от начала отсчёта), произрастающих в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк/л;

$\rho_{воды}$  – плотность ВВ, кг/л.

## Результаты и обсуждение

Результаты тестов ранговой корреляции по Спирмену для изучаемых параметров представлены в таблице 1. ОА НТО ВВ травы и листьев берёз, а также ТВ берёз име-

Таблица 1

**Уровни выявленных статистически значимых ранговых корреляций по Спирмену между изучаемыми параметрами и факторами влияния. Коэффициенты корреляции приведены с ошибками первого рода и количеством пар в каждой выборке**

[Table 1

**Levels of detected statistically significant Spearman rank correlation between studied parameters and factors of influence. Correlation factors are given with errors of first kind and number of pairs in every sample]**

Изучаемые параметры [Studied parameters]	Факторы влияния [Factors of influence]		
	Время от начала вегетационного периода, сут [Time from the beginning of the vegetation period, days]	Расстояние от озера Кызылташ, м [Distance from Lake Kyzyltash, m]	Влажность, % [Humidity, %]
ОА НТО ВВ растений и ТВ берёз, Бк/л* [VA НТО IW of plants and TW of birch-trees, Bq/l*]	-0,26 p=0,043 n=60	-0,67 p<10 <sup>-6</sup> n=60	0,35 p=0,025 n=40

Исследуемые параметры [Studied parameters]	Факторы влияния [Factors of influence]		
	Время от начала вегетационного периода, сут [Time from the beginning of the vegetation period, days]	Расстояние от озера Кызылташ, м [Distance from Lake Kyzyltash, m]	Влажность, % [Humidity, %]
Влажность, % [Humidity, %]	-0,48 p=0,0015 n=40	-	1,0

\* – объёмная активность трития внутриклеточной воды растений и транспирационной воды берёз, Бк/л [Tritium volume activity of intracellular water of plants and transpiration water of birch-trees, Bq/l]

ла статистически значимые: обратную слабую по шкале Чеддока ранговую корреляционную связь со временем от начала вегетационного периода ( $r=-0,26$ ), обратную заметную с расстоянием от берега озера Кызылташ ( $r=-0,67$ ) и прямую умеренную ранговую корреляционную связь с влажностью проб растений ( $r=0,35$ ). Последнее, возможно, связано с наличием в объединённой пробе крапивы двудомной (*Urtica dioica L.*) в отобранных с уреза проб травы, характеризующихся как большими значениями влажности, так и большими значениями ОА НТО ВВ.

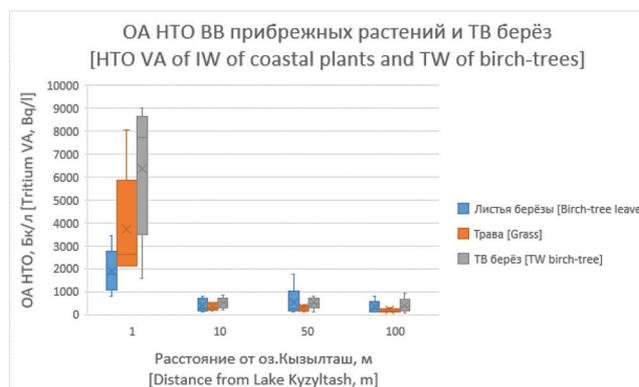
Влажность проб растений имела статистически значимую обратную умеренную ранговую корреляционную связь с временем от начала вегетационного периода ( $r=-0,48$ ). Было выявлено статистически значимое различие между медианами влажности травы и листьев берёзы (тест Вилкоксона,  $W=80$ ,  $p=8,4e-3$ ), равными 72,0% и 61,8% соответственно.

Из информации, представленной в таблице 1, следует, что в процессе вегетационного периода в пробах растений снижалась влажность, что подтверждается многочисленными исследованиями. Во время вегетационного периода растения постепенно накапливали органические вещества, что приводило к уменьшению содержания ВВ в конце вегетационного периода и, следовательно, к уменьшению влажности проб растений [6, 9, 14, 15].

Результаты измерения ОА НТО ВВ травы и листьев берёз, а также ОА НТО ТВ берёз (рис. 2) являлись исходными данными для оценки пространственного распределения ОА НТО в прибрежных растениях в зависимости от расстояния до берега озера Кызылташ.

По тестам Фридмана и апостериорному анализу (Post Hoc) было выявлено, что медианы ОА НТО ВВ травы и листьев берёз и ТВ берёз статистически значимо больше у береговой линии (ВВ травы:  $p=0,004$ , Post Hoc – различие между группой «Береговая линия» и всеми остальными,  $p=0,05$ ; ВВ листьев берёзы:  $p=0,03$ , различия: между группой «Береговая линия» и ~10 м,  $p=0,05$ , между группой «Береговая линия» и ~100 м,  $p=0,05$ ; ТВ берёз:  $p=0,004$ , Post Hoc – различие между группой «Береговая линия» и всеми остальными,  $p=0,05$ ). Таким образом, по ОА НТО ВВ травы и листьев берёз и ТВ берёз стоит различать только 2 зоны: зона береговой линии от 0 до ~5 м и зона от ~5 до 100 м от берега озера Кызылташ.

В таблице 2 представлены статистические характеристики ОА НТО в зависимости от исследованной пробы и зоны озера Кызылташ. Несмотря на практически двукратное превышение по среднему геометрическому значению, вследствие малого числа случаев отсутствовало статистически значимое различие между медианами ОА



**Рис. 2.** Пространственное распределение объёмной активности НТО ВВ прибрежных растений и ТВ берёз в зависимости от расстояния до озера Кызылташ: синий ящик – объёмная активность НТО внутриклеточной воды листьев берёз; коричневый ящик – объёмная активность НТО внутриклеточной воды проб травы; серый ящик – объёмная активность трития транспирационной воды берёз; крестик посередине ящика – среднее арифметическое по выборке; горизонтальная линия внутри ящика – медиана; нижняя и верхняя грань ящика – это межквартильный размах. Горизонтальные черточки на конце «усов» – максимальное и минимальное значение (без учета выбросов). Каждый ящик с усами представлен 5 измерениями

(Note. Blue box – HTO volume activity of intracellular water of birch-tree leaves; brown box – tritium volume activity of intracellular water of grass samples; grey box – HTO volume activity transpiration water of birch-trees. A cross in the middle of the box – arithmetic mean of the sample. Horizontal line inside the box – median. Lower and upper sides of the box – interquartile range. Horizontal dashes at the end of “mustache” – maximum and minimum values (excluding releases).

Each box with “mustache” is presented by 5 dimensions]

НТО ВВ травы и листьев берёзы в зоне 0...~5 м от берега (тест Вилкоксона,  $W=3$ ,  $p=0,056$ ).

Очевидно, что растения береговой линии активно использовали воду озера Кызылташ, так как ОА НТО в пробах растений береговой линии была приблизительно на порядок величины больше ОА НТО растений зоны от ~5 до 100 м.

Согласно исследованиям специалистов ЮУриБФ, среднее значение уровня ОА трития в воде озера Кызылташ в мае – сентябре 2021 г. составило ~16 кБк/л [7]. Таким образом, в 2021 г. ОА НТО ВВ растений, растущих у береговой линии, была в ~5...10 раз ниже ОА НТО в воде озера Кызылташ.

Таблица 2

Статистические характеристики ОА НТО в исследованных пробах растений вблизи озера Кызылташ, GM – среднее геометрическое,  $\sigma_g$  – стандартное геометрическое отклонение, n – число случаев

[Table 2

Statistical characteristics of НТО VA in the investigated samples of plants near Lake Kyzyltash, GM – geometric mean,  $\sigma_g$  – standard geometric deviation, n – number of cases]

Проба [Sample]	Зона озера Кызылташ, м [Lake Kyzyltash zone, m]	
	0...~5	~5...100
BB[W] Трава [Grass]	GM=3220 Бк/л $\sigma_g=1,75, n=5$	GM=240 Бк/л $\sigma_g=1,72, n=15$
	Листья берёзы [Birch-tree leaves]	GM=1680 Бк/л $\sigma_g=1,72, n=5$
TB[TW] Берёза [Birch-trees]	GM=5471 Бк/л $\sigma_g=2,05, n=5$	GM=390 Бк/л $\sigma_g=2,10, n=15$

Транспирация травяного напочвенного покрова вблизи озера Кызылташ не определялась. Для оценки ОА НТО ТВ травы вычислялось соотношение между ОА НТО ВВ и ТВ берёз. Коэффициент перехода от ОА НТО ВВ листьев берёз к ОА НТО ТВ, оцененный по среднему геометрическому: на расстоянии 0...~5 м был равен  $k_{1,тp} = 3,25$ ; при  $\sigma_g=2,36$  (n=5); на расстоянии ~5...100 м равен  $k_{2,тp} = 1,34$  при  $\sigma_g=2,19$  (n=15). Исходя из допущения, что у трав, растущих на береговой линии озера Кызылташ, коэффициент перехода от ОА НТО ВВ к ОА НТО ТВ такой же, как у берёз, оценка ОА НТО ТВ трав, растущих на расстоянии 0...~5 м, была равна  $3,22 \text{ кБк/л} * 3,25 = 10,5 \text{ кБк/л}$ , на расстоянии ~5...100 м равна  $240 \text{ Бк/л} * 1,34 = 322 \text{ Бк/л}$ .

Для определения активности трития, поступившего в форме НТО в воздух в поствегетационном периоде в 2021 г., с отмершими надземными частями растений, произрастающими вблизи озера Кызылташ, была создана модель прогнозирования влажности проб растений. Учитывая наличие статистически значимой корреляции между влажностью проб растений и временем от начала наблюдения, а также статистически значимого различия между медианами влажности у 2 типов растений, была выбрана модель с общей скоростью экспоненциального убывания и частными начальными значениями влажности:

$$RH(t)_{i,j} = RH(0)_{i,j} * e^{-\alpha * t} \quad (4)$$

где:

$RH(0)_{i,j}$  – частное начальное значение влажности в i-й зоне для j-го типа растений, %;

$\alpha$  – общая скорость убывания влажности, сут<sup>-1</sup>;

t – время от начала вегетационного периода, начиная с 01.05.2021 г., сут.

Численные значения параметров модели зависимости влажности проб растений от типа растений, зоны и времени наблюдения приведены в таблице 3. При подгонке параметров была использована логарифмическая шкала влажности растений. Все параметры модели статистически значимо отличались от нуля. При 40 наблюдениях и 36 степенях свободы скорректированный коэффициент детерминации был равен Adj. R<sup>2</sup>=0,49 при ошибке I рода p=4,2e-06. Ошибка модели в логарифмической шкале была равна  $\epsilon=0,11$ , что соответствовало стандартному геометрическому отклонению  $\sigma_g=1,12$ .

Из таблицы 3 следует, что общий период полуубывания влажности в растениях составил  $\frac{\ln(2)}{2,65e-3} \cong 262$  сут или 0,72 года при начальных значениях в диапазоне от ~74% до ~93% в зависимости от выбранного индекса зоны наблюдения и типа растений. Наибольшее начальное значение влажности проб растений наблюдалось в траве прибрежной зоны, наименьшее – на расстояниях от ~5 до 100 м в листьях берёзы.

Для оценки активности НТО, поступившего в воздух в поствегетационном периоде в 2021 г. с отмершими надземными частями растений, произрастающих вблизи озера Кызылташ, была создана модель прогнозирования ОА НТО ВВ растений. Учитывая наличие статистически значимой ранговой корреляции между ОА НТО ВВ растений и временем от начала вегетационного периода, а также отсутствие статистически значимого различия между

Таблица 3

Численные значения параметров модели влажности растений в зависимости от типа растений, зоны и времени наблюдения от начала вегетационного периода 2021 г.

[Table 3

Parameter values of plant humidity models based on a type of plants, a zone and follow-up time from the beginning of the vegetation period of 2021]

i-й	Частные параметры $RH(0)_{i,j}$ [Private parameters $RH(0)_{i,j}$ ]		Общий параметр $\alpha$ , сут <sup>-1</sup> [A common parameter $\alpha$ , day <sup>-1</sup> ]
	j-м	Лист берёзы, j=1 [A birch-tree leaf, j=1]	
i=1, Зона от 0 до 5 м от озера [i=1, A zone from 0 to 5 m from the lake]		$e^{4,389 \pm 0,063} \cong \cong (80,6 \pm 5,1)\%$	$e^{4,527 \pm 0,072} \cong \cong (92,5 \pm 6,7)\%$
i=2, Зона от 5 до 100 м от озера [i=2, A zone from 5 to 100 m from the lake]		$e^{4,305 \pm 0,075} \cong \cong (74,1 \pm 5,5)\%$	$e^{4,443 \pm 0,083} \cong \cong (85,0 \pm 7,0)\%$

медианами ОА НТО у 2 типов растений внутри обеих зон, была создана модель экспоненциального убывания с общей скоростью и частными начальными значениями объёмной активности:

$$VA(t)_i = VA(0)_i * e^{-\beta * t} \quad (5)$$

где:  
 $VA(t)_i$  – частное начальное значение ОА НТО ВВ растений в i-й зоне, Бк/л;

$\beta$  – общая скорость убывания ОА НТО ВВ растений,  
 $t$  – время наблюдения относительно 01.05.2021 г., сут.

Численные значения параметров модели зависимости ОА НТО ВВ растений от индекса зоны и времени наблюдения с начала вегетационного периода 2021 г. приведены в таблице 4. При подгонке параметров была использована логарифмическая шкала ОА НТО. Все параметры модели статистически значимо отличались от нуля. При 40 наблюдениях и 37 степенях свободы скорректированный коэффициент детерминации был равен Adj.  $R^2=0,74$  при ошибке I рода  $p=6,2e-12$ . Ошибка модели в логарифмической шкале была равна  $\epsilon=0,60$ , что соответствовало стандартному геометрическому отклонению  $\sigma_g = 1,81$ .

Из таблицы 4 следует, что общий период полуубывания ОА НТО ВВ растений составил  $\frac{\ln(2)}{1,08e-2} \cong 64$  сут или около 2 месяцев при начальном значении (на 01.05.2021 г.), равном 5860 Бк/л для береговой линии от 0 до ~5 м и 664 Бк/л для зоны от ~5 до 100 м. Таким образом, скорость убывания ОА НТО ВВ растений была приблизительно в  $\frac{0,0108}{0,001378} \cong 8$  раз выше, чем общая скорость убывания ОА НТО в озере Кызылташ в том же периоде наблюдения [7]. Это, вероятно, было связано со значительным снижением и полной остановкой к концу вегетационного периода обменных процессов в растениях [9].

Для оценки уровня годового поступления трития в воздух в форме паров НТО от прибрежных растений

озера Кызылташ был произведён расчёт площади почвы на расстоянии до 100 м вокруг озера Кызылташ и площади крон деревьев, произрастающих на ней, с помощью спутниковых снимков высокого разрешения, предоставляемых сервисом Google Earth.

Результаты измерения площадей исследованных зон озера Кызылташ и площади крон деревьев, произрастающих на ней, приведены в таблице 5.

Из информации, представленной в таблице 5, следует, что площадь почвы зоны от 0 до ~5 м меньше, чем площадь зоны от ~5 до 100 м, в 5,1 раза, а площадь крон деревьев зоны от 0 до ~5 м меньше в 3,8 раза площади крон деревьев, растущих в зоне ~5 до 100 м. Общая площадь почвы исследованных зон озера Кызылташ была равна ~1,93 км<sup>2</sup>, площадь крон деревьев, растущих на данной территории, равна ~1,41 км<sup>2</sup>.

В таблице 6 приведены оценки поступления НТО в воздух из различных источников испарений, а также их вклад в суммарное годовое поступление, выраженный в процентах. Суммарное годовое поступление трития в воздух в 2021 г. от прибрежных растений составило 6,92E+11, или ~0,35% от годового поступления трития с поверхности озера Кызылташ [7].

Основной вклад в поступление трития в воздух от растений в форме паров НТО вносила транспирация растений 6,89E+11 Бк, т.е. 99,6% от годового поступления НТО от всех растений. Самое значительное поступление НТО в воздух производили растения береговой линии озера Кызылташ (0...~5 м) (81,8%). Несмотря на то, что площадь почвы зоны 0...~5 м меньше в 5,1 раза площади почвы зоны ~5...100 м, растения зоны 0...~5 м давали 81,8% от всего годового поступления трития от растений исследованных зон озера Кызылташ. Годовое поступление НТО только от растений береговой линии озера Кызылташ (0...~5 м), равное (5,66E+11 Бк), было сопоставимо с выбросами НТО в 2021 г. от Курской АЭС (5,32 E+11 Бк), а поступле-

Таблица 4

Численные значения параметров модели зависимости ОА НТО ВВ растений от индекса зоны и времени наблюдения с начала вегетационного периода 2021 г.

[Table 4

Parameter values of a model of association between HTO VA of IW of plants and a zone index and follow-up time from the beginning of the vegetation period of 2021]

Частные параметры $VA(0)_i$ , [Private parameters $VA(0)_i$ ]		
i=1 Зона от 0 до 5 м от озера [i=1 A zone from 0 to 5 m from the lake]	i=2 Зона от 5 до 100 м от озера [i=2 A zone from 5 to 100 m from the lake]	Общий параметр $\beta$ =сут <sup>-1</sup> [A common parameter, $\beta$ =day <sup>-1</sup> ]
$e^{8,676 \pm 0,327} \cong$ $\cong (5860 \pm 1920)$ Бк/л	$e^{6,498 \pm 0,392} \cong$ $\cong (664 \pm 260)$ Бк/л	-1,08e-2 ± 3,14e-3

Таблица 5

Площади почвы и крон деревьев исследованных зон озера Кызылташ, 10<sup>6</sup> м<sup>2</sup> (или км<sup>2</sup>)

[Table 5

Areas of the soil and the tree crowns of the studied zones of Lake Kyzyltash, 10<sup>6</sup> m<sup>2</sup> (or km<sup>2</sup>)

Дата снимка [Date of a picture]	Площадь почвы зоны от 0 до ~5 м, (км <sup>2</sup> ) [Soil area of the zone from 0 to ~5 meters, (km <sup>2</sup> )]	Площадь крон деревьев зоны от 0 до ~5 м, (км <sup>2</sup> ) [Tree crown area of the zone from 0 to ~5 meters, (km <sup>2</sup> )]	Площадь почвы зоны ~5 до 100 м, (км <sup>2</sup> ) [Soil area of the zone from ~5 to 100 meters, (km <sup>2</sup> )]	Площадь крон деревьев, растущих в зоне ~5 до 100 м, (км <sup>2</sup> ) [Tree crown area of the zone from ~5 to 100 meters, (km <sup>2</sup> )]
12.06.2021 г.	0,316	0,293	1,618	1,116

Оценки поступления НТО в воздух из различных источников испарений и их вклад в суммарное годовое поступление  
 Estimates of HTO intake into the air from various sources of evaporation and their contribution to the total annual intake

Таблица 6

[Table 6]

Период [Period]	Транспирация [Transpiration]				Поствегетационный период [Post-vegetation period]			
	Зона, м [Zone, m]		Зона, м [Zone, m]		Зона, м [Zone, m]		Зона, м [Zone, m]	
Источники испарений [Evaporation source]	Трава [Grass]	Листья [Leaves]	Трава [Grass]	Листья [Leaves]	Трава [Grass]	Листья [Leaves]	Трава [Grass]	Листья [Leaves]
Поступление трития в воздух, Бк [Tritium intake to the air, Bq]	4,32E+11	1,32E+11	6,79E+10	5,68E+10	1,52E+09	8,99E+07	8,08E+08	3,56E+07
Вклад в сумму, % [Contribution to the sum, %]	62,5	19,1	9,8	8,2	0,22	0,01	0,12	0,01
	81,6		18,0		0,23		0,12	
	99,6				0,4			

ние НТО от всех прибрежных растений озера Кызылташ – с выбросами Ленинградской АЭС (6,90E+11 Бк) [16].

*Объёмная активность трития в воздухе вблизи озера Кызылташ*

Результаты измерения ОА НТО в конденсате воздуха и расчётные значения ОА трития воздуха вблизи озера Кызылташ представлены в таблице 7.

Из информации, представленной в таблице 7, следует, что ОА НТО в воздухе у береговой линии и в 20 м в районе «Полигон» статистически значимо не отличались по медиане (парный тест Вилкокса, W=5, p=0,5), вероятно, вследствие малого количества параллельных проб. Средняя ОА НТО в воздухе в 100 м от береговой линии в районе Гаражи по 3 измерениям была на уровне 8,7 Бк/м<sup>3</sup>. Заслуживает внимания низкая ОА трития в воздухе проб, отобранных в ходе экспедиции 01.07.2021 г., которая была более чем на порядок величины меньше значения ОА трития проб воздуха, собранных в 2 других экспедициях, особенно это заметно для пробы с расстояния 20 м от берега. Это была единственная экспедиция накануне и во время кото-

рой шёл дождь. Наиболее вероятно, что воздушная масса с высоким содержанием влаги (относительная влажность воздуха 01.07.2021 г. составляла 65–71%), сформировавшаяся вдали от ПО «Маяк», принесла осадки в виде дождя, снизив ОА трития в воздухе вблизи самого озера Кызылташ.

Средняя ОА НТО в воздухе у береговой линии озера Кызылташ по 2 экспедициям в отсутствие осадков составляла ~60 Бк/м<sup>3</sup>, что в ~30 раз меньше допустимой ОА трития во вдыхаемом воздухе для населения, равной 1,9E+3 Бк/м<sup>3</sup> согласно НРБ-99/2009<sup>5</sup>.

В случае гипотетического проживания на берегу озера Кызылташ в 2021 г. и постоянном уровне ОА трития в окружающей среде годовая ожидаемая эффективная доза (ОЭД) внутреннего облучения, обусловленная ингаляцией паров НТО, согласно НРБ-99/2009<sup>5</sup>, для стандартных условий составит 60 Бк/м<sup>3</sup> × 1900 м<sup>3</sup>/год × 2,7 · 10<sup>-10</sup> Зв/Бк ≤ 31 мкЗв/год для критической группы детей возраста 1–2 года и 60 Бк/м<sup>3</sup> × 8100 м<sup>3</sup>/год × 1,8 · 10<sup>-11</sup> Зв/Бк ≤ 8,7 мкЗв/год для взрослого населения. Данные оценки являются консервативными, так как не учитывают ледоставный период, в течение ко-

ОА НТО в конденсате воздуха и расчётные значения ОА НТО воздуха вблизи озера Кызылташ

Таблица 7

[Table 7]

HTO VA in air condensate and estimated values of HTO VA near Lake Kyzyltash

Дата наблюдения [Follow-up date]	Зона наблюдения [Follow-up zone]					
	Береговая линия, полигон (номер 3 на рисунке 1) [Coastline, test site (no. 3 in Fig. 1)]		20 м от берега, полигон (номер 3 на рисунке 1) [20 meters from the lakeside, test site (no. 3 in Fig. 1)]		100 м от берега, гаражи (номер 2 на рисунке 1) [100 meters from the lakeside, garages (number 2 in Fig. 1)]	
	ОА НТО конденсата воздуха, Бк/л [HTO VA of the air condensate, Bq/l]	ОА НТО в воздухе, Бк/м <sup>3</sup> [HTO VA in the air, Bq/m <sup>3</sup> ]	ОА НТО конденсата воздуха, Бк/л [HTO VA of the air condensate, Bq/l]	ОА НТО в воздухе, Бк/м <sup>3</sup> [HTO VA in the air, Bq/m <sup>3</sup> ]	ОА НТО конденсата воздуха, Бк/л [HTO VA of the air condensate, Bq/l]	ОА НТО в воздухе, Бк/м <sup>3</sup> [HTO VA in the air, Bq/m <sup>3</sup> ]
17.06.2021 г.	5600	62,2	5060	58,2	1860	18,7
01.07.2021 г.	170	2,8	300	4,8	150	2,3
02.09.2021 г.	6650	62,1	6130	59,3	530	5,0

<sup>5</sup> Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ99/2009) [Sanitary rules and standards SanPin 2.6.1.2523-09. Radiation safety standards (RSS-99/2009) (In Russ.)].

того испарение воды с поверхности озера Кызылташ и поступление из растений практически отсутствуют.

### Заключение

Из анализа исходных данных и математического моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Исследованное пространство вокруг озера Кызылташ следует делить на 2 зоны: от 0 до ~5 м от береговой линии и ~5...100 м от неё, отличающиеся по уровню ОА НТО в растениях на порядок величины. Вероятной причиной различия являлось интенсивное поглощение корневой системой растений береговой линии воды из озера Кызылташ.

2. Наблюдаемые обратные ранговые корреляции ОА НТО в пробах растений носили характер от слабой (со временем от начала вегетационного периода) до заметной (с расстоянием до берега озера Кызылташ). Модельная оценка общего периода полужизни ОА НТО ВВ растений в течение их вегетации составила около 2 месяцев (64 сут).

3. Обратная ранговая корреляция влажности проб растений и времени от начала вегетационного периода была умеренной. Влажность в траве была больше, чем в листьях берёзы, по медианному значению в 1,15 раза (~71% против ~62%). Общий период полужизни влажности в растениях составил около 9 месяцев (262 сут).

4. Построенные по исходным данным модели позволили оценить ОА НТО ВВ и влажность в растениях в конце вегетационного периода и оценить поступление трития в воздух в поствегетационном периоде.

5. Оценка общего поступления НТО в воздух от прибрежных растений в 2021 г. была равна ~0,7 ТБк, что составляло ~0,35% от поступления трития с поверхности озера Кызылташ за счёт испарения. Подавляющий вклад (99,6%) в поступление от растений внёс процесс транспирации в течение вегетационного периода. Растения береговой линии 0...~5 м, несмотря на меньшую в 5,1 раза площадь почвы, внесли в ~ 4,5 раза больший вклад (81,8%) в сравнении с зоной ~5...100 м (18,1%) в итоговое поступление НТО в окружающую среду. Вклад отмершей травы и листьев берёзы в итоговое поступление НТО в поствегетационном периоде составил всего 0,4%.

6. Оценка ОА НТО в воздухе у береговой линии озера Кызылташ по 2 экспедициям в отсутствие осадков составляла ~60 Бк/м<sup>3</sup>, что было в ~30 раз меньше допустимой ОА трития во вдыхаемом воздухе для населения, равной 1,9Е+3 Бк/м<sup>3</sup> согласно НРБ-99/20095. Таким образом, нахождение у берега озера Кызылташ являлось безопасным с точки зрения внутреннего облучения от трития.

7. Резкое изменение ОА НТО ВВ растений между зонами 0...~5 м от берега озера Кызылташ и остальной зоной ~5...100 м на порядок величины, а также сравнительно слабое изменение ОА трития в воздухе между берегом и на расстоянии ~20 м (~10%) подтвердило факт о превосходящем поступлении воды в растения из почвы через корневую систему над абсорбцией паров воды листьями из воздуха.

8. В случае гипотетического проживания на берегу озера Кызылташ в 2021 г. и постоянном уровне ОА трития в объектах окружающей среды консервативные оценки годовых ОЭД внутреннего облучения, обусловленных ингаляцией паров НТО, для стандартных условий соста-

вят 31 мкЗв/год для критической группы детей возраста 1–2 года и 8,7 мкЗв/год для взрослого населения.

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

Востротин В.В.:

- существенный вклад в разработку концепции исследования; сбор, анализ и интерпретация данных;
- написание текста статьи и ее редактирование для важного интеллектуального содержания;
- утверждение окончательного варианта статьи для публикации;
- согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Финашов Л.В.:

- существенный вклад в разработку концепции исследования; сбор, анализ и интерпретация данных;
- написание текста статьи и ее редактирование для важного интеллектуального содержания;
- утверждение окончательного варианта статьи для публикации;
- согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

### Благодарности

Авторы благодарят сотрудников Южно-Уральского регионального аварийного медико-дозиметрического центра (ЮУРАМДЦ) А.И. Алдошина и В.А. Марова за техническое обеспечение по перевозке отобранных проб и дозиметрический контроль.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за ценные замечания, которые способствовали улучшению качества публикации.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие здравоохранения» по контракту № 11.301.21.0 шифр «Кызылташ-21», финансируемого ФМБА России.

### Литература

1. Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С., и др. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. Под ред. В.С. Калистратовой. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2012. 464 с. URL: <http://ecoradmod.narod.ru/rus/publication2/RNМonografiya.pdf> (Дата обращения: 03.03.2023).
2. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Клочков В.Н., и др. Распространение трития и его соединений в окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации Калининской АЭС // Медицина труда и промышленная экология. 2021. Т. 61, № 9. С. 594-600. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-594-600>.
3. Янов А.Ю., Востротин В.В., Финашов Л.В. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты // Человек. Спорт. Медицина. 2016. Т. 16, № 2. С. 85-99. DOI: 10.14529/hsm160209.

4. Mohamed Abdou, Marco Riva, Alice Ying, et al. Physics and technology considerations for the deuterium-tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency // *Nuclear Fusion*. 2021. Vol. 61, № 1. P. 51. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abfb35>.
5. Baojie Nie, Siyuan Wu, Derui Yang, et al. Quantitative prediction of dynamic HTO migration behavior in the soil and non-negligible evapotranspiration effect // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 425, № 127772. P. 9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127772> (Дата обращения: 03.04.2023 г.).
6. Поливкина Е.Н., Ларионова Н.В., Ляхова О.Н. Оценка аэраляного поглощения НТО культурой *Helianthus Annuus* в условиях Семипалатинского испытательного полигона // *Радиация и риск*. 2020. Т. 29, № 1. С.79-89. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-1-79-89>.
7. Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 4. С. 88-96. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96>.
8. Чеботина М.Я., Николин О.А., Смагин А.И., Мурашова Е.Л. Тритий в водоемах производственного и комплексного назначения в районе по «Маяк» на Урале // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2011. № 4. С. 75-84.
9. Лебедев С.И. *Физиология растений*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1988. 543 с.
10. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Всемирная Метеорологическая Организация, 2008: ВМО-№ 8, 2014. 788 с.
11. Нормативно-производственный регламент содержания зеленых насаждений, утвержденный Приказом Госстроя России от 10 декабря 1999 г. № 145. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=49758> (Дата обращения: 03.04.2023 г.).
12. Земсков Ф.И., Галкин В.С., Анохина Н.А., и др. Методические особенности исследования динамики поступления опада в условиях стационарных почвенных лизиметров // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*, 2017. № 1. С. 9-15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-osobennosti-issledovaniya-dinamiki-postupleniya-opada-v-usloviyah-statsionarnyh-pochvennyh-lizimetrov> (Дата обращения: 03.04.2023 г.).
13. Grabovsky V.I., Zukert N.V., Korzukhin M.D. Estimates of leaf-area index for the territory of Russia using State Forest Inventory data // *Contemporary Problems of Ecology*. 2016. Vol. 9, №. 7. P. 814–819. <https://doi.org/10.1134/S1995425516070064>.
14. Гончарова Э.А., Удовенко Г.В., Нечипоренко Г.А., Жолкевич В.Н. Изучение водообмена плодов кабачка с помощью тритиевой метки // *Физиология растений*. 1984. Т. 31, № 5. С. 841-846.
15. Грибачева О.В., Сотников Д.В., Черская Н.А., и др. Листовой опад в полезащитных лесных полосах Луганщины // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова*. 2022. Т. 66, № 1. С. 68–75. DOI: 10.34655/bgsha.2022.66.1.009.
16. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 г. Ежегодник. Обнинск, 2022. 342 с.

Поступила: 11.04.2023 г.

**Востротин Вадим Владимирович** – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, г. Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: [vostrotin@subi.su](mailto:vostrotin@subi.su)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3999-5223>

**Финашов Леонид Викторович** – научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озёрск, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-6589>

**Для цитирования:** Востротин В.В., Финашов Л.В. Оценка поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г. // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 2. С. 78-90. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-78-90

## Estimate of Tritium Intake in the Air from Coastal Plants of Lake Kyzyltash in 2021

Vadim V. Vostrotnin, Leonid V. Finashov

South Ural Institute of Biophysics, Ozersk, Chelyabinsk region, Russia

*The goal of the research was determination of the level of annual tritium intake in the air from coastal plants of Lake Kyzyltash in 2021 and compliance of tritium content in the air of the coastal area of Lake Kyzyltash in 2021 with radiation safety standards. In the period May-September, 2021, a study of coastal plants near Lake Kyzyltash, a technological reservoir of the Mayak Production Association, was conducted. Within 100 m from the lakeside, humidity level of plants ranged from 41% to 87%, tritium volume activity level in the water of plants and transpiration water varied from 96 Bq/l to ~8.0 kBq/l and from 64 Bq/l to ~9.0 kBq/l, correspondingly. Based on the Cheddock scale, rank correlations between tritium volume activity and: time from the beginning of a vegetation period (weak reverse); distance from the lakeside (marked reverse); humidity of the plants (moderate positive), were revealed. To predict tritium intake in the air in the form HTO during the post-vegetative period, exponential decrease models of humidity and tritium volume activity in the plants with time were developed. The estimates of general periods of semi-decrease in humidity and tritium volume activity in the water of the plants, were 262 and 64 days, correspondingly. Total annual HTO intake in the air in 2021 from coastal plants was  $6.92 E+11$ Bq, with contribution 0.35% of annual tritium intake from Lake Kyzyltash surface. The plants from the zone 0...~5m contribute 81.8% of total annual intake from coastal plants of Kyzyltash Lake ( $5.66E+11$ Bq). Annual HTO intake from the plants of Lake Kyzyltash coastline (0...~5m) only, was  $5.66E+11$ Bq and was consistent with tritium release in 2021 from the Kursk Nuclear Power Plant ( $5.32E+11$ Bq), and tritium intake from all coastal plants of Lake Kyzyltash – with release from the Leningrad Nuclear Power Plant ( $6.90E+11$ Bq). In the course of two expeditions, if there were no precipitations, the mean HTO volume activity in the air of Lake Kyzyltash coastal areas was ~60 Bq/m<sup>3</sup>, which is ~30 times less than permissible volume activity in the inhaled air for population  $1.9E+3$ Bq/m<sup>3</sup>, according to NRB-99/2009. In the case of a hypothetical residence on the lakeside of Lake Kyzyltash in 2021 and a permanent level of tritium volume activity in natural environments, an annual committed effective dose of internal radiation conditioned by inhalation of super-heavy water vapor, will be 31 μSv/year for a critical group of children aged 1-2 years and 8.7 μSv/year for adult residents, according to NRB-99/2009. These estimates are conservative as far as they do not take into account the ice-free period during which there is practically no evaporation of water from Lake Kyzyltash surface and intake from plants.*

**Key words:** tritium, plants, coastline, transpiration, air, Lake Kyzyltash, Mayak Production Association.

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

Vostrotnin V.V.:

- significant contribution to the development of the research concept; collection, analysis and interpretation of the data;
- writing and editing the article for important intellectual content;
- approval of the final version of the article for publication;
- consent to be responsible for all aspects of the article ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.

Finashov L.V.:

- significant contribution to the development of the research concept; collection, analysis and interpretation of the data;
- writing and editing the article for important intellectual content;
- approval of the final version of the article for publication;

– consent to be responsible for all aspects of the article ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.

### Acknowledgements

The authors thank the colleagues from the Southern Urals Regional Emergency Medical Dosimetric Center (SUREMDC) Aidoshin A.I. and Marov V.A. for technical support for the transportation of selected samples and dosimetric control.

The authors express deep gratitude to the reviewers for valuable comments that contributed to improving the quality of the publication.

### Conflict of interest

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

### Funding

The work was carried out within the framework of the State Program of the Russian Federation “Health development”

**Vadim V. Vostrotnin**

South Ural Institute of Biophysics

**Address for correspondence:** 456783, Russia, Chelyabinsk region, Ozyorsk, Ozyorskoe shosse, 19; E-mail: [vostrotnin@subi.su](mailto:vostrotnin@subi.su)

under the contract no. 11.301.21.0 a codename "Kyzyltash-21" funded by the FMBA of Russia.

## References

1. Kalistratova VS, Belyaev IK, Zhorova ES, Nisimov PG, Parfenova IM, Tishchenko GS, et al. Radiobiology of incorporated radionuclides. Edited by Kalistratova V.S. Publisher Burnasyan FMBC of the FMBA of Russia; 2012. 464 p. (In Russian). Available from: <http://ecoradmod.narod.ru/rus/publication2/RNMonografiya.pdf> (Accessed: 03.03.2023).
2. Barchukov VG, Kochetkov OA, Klochkov VN, Eremina NA, Maksimov AA. Distribution of tritium and its compounds in the environment under normal conditions of operating of Kalininskaya nuclear power plant. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2021;61(9): 594-600. (In Russian). Available from: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-594-600> (Accessed: 03.03.2023).
3. Yanov AYu, Vostrotin VV, Finashov LV. Environmental Tritium in the Ural Region: Current Situation and Radiation Protection Analysis of Research Perspectives. *Chelovek. Sport. Meditsina = Human. Sport. Medicine*. 2016;16(2): 85-99. (In Russian). Available from: DOI: 10.14529/hsm160209 (Accessed: 03.03.2023).
4. Mohamed Abdou, Marco Riva, Alice Ying, Christian Day, Alberto Loarte, Baylor LR, et al. Physics and technology considerations for the deuterium-tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency. *Nuclear Fusion*. 2021;61(1): 51. Available from: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abbf35> (Accessed: 03.03.2023).
5. Baojie Nie, Siyuan Wu, Derui Yang, Deyi Chen, Weiguo Gu, Wentao Zhou, et al. Quantitative prediction of dynamic HTO migration behavior in the soil and non-negligible evapotranspiration effect. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;425: 127772. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127772>. (Accessed: 03.03.2023).
6. Polivkina EN, Larionova NV, Lyakhova ON. Evaluation of the aerial uptake of HTO by Helianthus Annuus culture under the conditions of the Semipalatinsk test site. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2020;29(1): 79-89. (In Russian). Available from: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-1-79-89> (Accessed: 03.03.2023).
7. Vostrotin V.V., Yanov A.Yu. Estimation of the level of annual tritium entry into the air from the surface of the Kyzyltash lake. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4):88-96. (In Russian). Available from: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96> (Accessed: 03.03.2023).
8. Chebotina MYu, Nikolin OA, Smagin AI, Murashova E. Tritium in water reservoirs of production and complex purpose close to Mayak PA. *Vodnoe khozyaystvo Rossii = Water management of Russia*. 2011;4: 75-84. (In Russian).
9. Lebedev SI. Plant physiology. 3rd ed., revised. and additional. Moscow: Agropromizdat; 1988. 543 p. (In Russian).
10. Guide to meteorological instruments and observation methods. World Meteorological Organization, 2008: WMO-No. 8; 2014. 788 p. (In Russian).
11. Regulatory and production regulations for the maintenance of green spaces approved by order of the State Committee for Construction of Russia of December 10; 1999, No. 145 (In Russian).
12. Zemskov FI, Galkin VS, Anokhina NA, Bogatyrev LG, Demidova AN, Prilepsky NG, et al. Methodological features of the studies of the dynamics of the receipt of litter in conditions of stationary soil tanks. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil science*. 2017;1: 9-15. (In Russian). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-osobennosti-issledovaniya-dinamiki-postupleniya-opada-v-usloviyah-statsionarnyh-pochvennyh-lizimetrov> (Accessed: 03.03.2023).
13. Grabovsky VI, Zukert NV, Korzukhin MD. Estimates of leaf-area index for the territory of Russia using State Forest Inventory data. *Contemporary Problems of Ecology*. 2016;9(7): 814-819. Available from: <https://doi.org/10.1134/S1995425516070064> (Accessed: 03.03.2023).
14. Goncharova EA, Udovenko GV, Nechiporenko GA, Zholkevich VN. Study of water exchange of courgette fruits using a tritium label. *Fiziologiya rasteniy = Plant Physiology*. 1984;31(5): 841-846. (In Russian).
15. Gribacheva OV, Sotnikov DV, Cherskaya NA, Karmazina AV, Kravets AL. Leaf litter in the field-protective forest belts of the Luhansk region. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii imeni V.R. Filippova = Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov*. 2022;66(1): 68-75. (In Russian). Available from: DOI: 10.34655/bgsha.2022.66.1.009 (Accessed: 03.03.2023).
16. Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2021. *Annals. Obninsk* 2022; 342 p. (In Russian).

Received: April 11, 2023

**For correspondence: Vadim V. Vostrotin** – Candidate of Biology Sciences, Head of laboratory of radiation safety, Senior Researcher, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency (Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk region, 456783, Russia; E-mail: [vostrotin@subi.su](mailto:vostrotin@subi.su))

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3999-5223>

**Leonid V. Finashov** – Research Assistant laboratory radiation safety, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-6589>

**For citation: Vostrotin V.V., Finashov L.V. Estimate of Tritium Intake in the Air from Coastal Plants of Lake Kyzyltash in 2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 78-90 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-78-90**

## Разработка сценариев облучения населения для земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением

И.Л. Абалкина, А.А. Аракелян, Е.В. Муленкова, А.А. Самойлов, С.В. Панченко, М.Ю. Ширнин

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

*В статье рассмотрен опыт разработки сценариев облучения населения для земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением на примере 3 площадок, расположенных в городах Москве и Санкт-Петербурге. Цель исследования состояла в идентификации предполагаемых групп пользователей земельных участков и выборе параметров для расчета доз облучения. Сценарии облучения при использовании земельных участков для проживания или работы описывались такими параметрами, как время пребывания, нахождение внутри помещений или на открытом воздухе, физическая активность и др. Пути облучения для выбранных пользователей определялись с использованием инструментария концептуальной модели площадки. Для расчетов в рамках ряда сценариев было выполнено геомиграционное моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде с использованием расчетного кода GeRa. Расчеты доз облучения групп населения проводились с помощью программного модуля «Экорад-Аква». Дозы рассчитывались по каждому пути облучения. Проведенное исследование показывает, что предложенный сценарий «Работник офиса» может быть применен для различных земельных участков при их планируемом использовании для размещения административных, производственных, научных, торговых зданий и сооружений, сценарий «Строительный рабочий» – для участков, на которых ведутся строительные и земляные работы. Сценарий «Житель» по своим параметрам применим к условиям многоквартирной жилой застройки в крупных городах. В перспективе целесообразна разработка типового сценария для работника, чья деятельность связана с нахождением на открытом воздухе и состоит в проведении работ по уходу и содержанию территории. Указанные сценарии могут использоваться в качестве готовых решений для расчетов доз облучения населения от остаточной радиоактивности на площадках выводимых из эксплуатации объектов использования атомной энергии и реабилитируемых территориях. Оценки годовых эффективных доз облучения населения необходимы для планирования работ по выводу из эксплуатации и реабилитации и определения значений радиационных факторов в соответствующих проектах.*

**Ключевые слова:** остаточное радиоактивное загрязнение, сценарий облучения, предполагаемое будущее использование земельных участков, концептуальная модель площадки, путь облучения, доза облучения, вывод из эксплуатации, реабилитация.

### Введение

В соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии НП-091-14<sup>1</sup> под остаточным радиоактивным загрязнением понимается загрязнение радионуклидами зданий, сооружений, помещений объектов использования атомной

энергии (ОИАЭ), объектов окружающей среды на площадке ОИАЭ, образовавшееся в результате эксплуатации ОИАЭ и остающееся после завершения работ по выводу из эксплуатации (ВЭ). Проектная документация ВЭ должна предусматривать перечень радиационных факторов, определяющих воздействие остаточного радиоактивного

<sup>1</sup> Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Общие положения» (НП-091-14). Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.05.2014 г. № 216 [Federal rules and regulations in the field of nuclear energy use «Ensuring of safety during decommissioning of nuclear facilities. General provisions». Approved by order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of 20.05.2014 No. 216. (In Russ.)]

**Абалкина Ирина Леонидовна**

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук

Адрес для переписки: 115191, Москва, ул. Б. Тульская, д. 52; E-mail: abalkina@ibrae.ac.ru

загрязнения на персонал и (или) население, окружающую среду. Согласно ОСПОРБ 99/2010<sup>2</sup>, проектные решения по выводу радиационного объекта из эксплуатации должны предусматривать реабилитацию высвобождаемых площадей и территорий, в проекте следует оценить ожидаемые индивидуальные и коллективные дозы облучения персонала и населения.

В зарубежной практике ВЭ ОИАЭ и реабилитации территорий учет будущего использования земельных участков является важной составляющей при планировании работ [1–4]. Например, Агентство по охране окружающей среды США на основе консультаций с заинтересованными сторонами принимает решение о вероятном использовании загрязненного участка для целей дальнейшей разработки мероприятий по очистке. В число самых общих видов использования входят жилищное, промышленное/торговое, рекреационное и экологическое. Конкретные типы объектов (т.е. офисный комплекс, торговый центр, футбольный стадион и др.) определяются при наличии более детальной информации [1].

Для характеристики загрязненных участков и выработки мер по очистке в мире широко используется такой инструмент, как концептуальная модель площадки (КМП) [5–7]. КМП – письменное или графическое представление экологической системы и биологических, физических и химических процессов, которые определяют перенос загрязняющих веществ из источников через компоненты природной среды к экологическим рецепторам в системе [8]. КМП представлена в большом числе зарубежных руководств и пособий [8–10], в том числе в международном стандарте ИСО 21365 [11]. Среди российских документов следует упомянуть ГОСТ Р 53123-2008<sup>3</sup>. В центре внимания КМП находится связь «источник – путь – рецептор»<sup>4</sup>, которая позволяет определить пути воздействия, по ко-

торым загрязнение влияет на человека, биоту и другие объекты. МАГАТЭ при описании процесса реабилитации территорий рекомендует создание КМП для описания источников загрязнения и путей облучения на этапе предварительного исследования [12].

Расчеты доз облучения могут выполняться как по типовым сценариям использования земельных участков, так и по сценариям, разрабатываемым для условий конкретной площадки. Обзор зарубежных калькуляторов и используемых в них входных параметров для участков с радиоактивным загрязнением представлен в работе [13].

В России пока не установлены радиационно-гигиенические и экологические критерии, которым должны соответствовать площадки выводимых из эксплуатации ОИАЭ. Данной проблематике посвящено немало публикаций, в том числе [14–16]. В случае частичного освобождения от регулирующего контроля радиационные характеристики площадок могут не совпадать с требованиями, которые будут предъявлены при том или ином их дальнейшем использовании. Проработка реалистичных вариантов будущей деятельности на освобождаемых площадках позволяет обеспечить заблаговременную увязку критериев конечного состояния выводимых из эксплуатации ОИАЭ и реабилитируемых территорий с санитарными нормами, регламентирующими проектирование и строительство зданий различного назначения<sup>5</sup>. В связи с этим актуальной является задача развития методических и практических подходов, позволяющих планировать работы по выводу из эксплуатации и обосновывать конечное состояние площадок с позиций их предполагаемого использования в будущем.

**Цель исследования** – разработка типовых сценариев облучения населения в зависимости от вариантов

<sup>2</sup> 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 (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 (hereinafter – OSPORB 99/2010). (In Russ.)]

<sup>3</sup> Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53123-2008 (ИСО 10381-5:2005). Качество почвы – Отбор проб – Часть 5: Руководство по изучению городских и промышленных участков на предмет загрязнения почвы. Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18.12.2008 г. № 543-ст. [National Standard of the Russian Federation GOST R 53123-2008 (ISO 10381-5:2005). Soil quality – Sampling – Part 5: Guidance on the procedure for the investigation of urban and industrial sites with regard to soil contamination. Approved and put into action by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of 18.12.2008, No. 543-st. (In Russ.)]

<sup>4</sup> В стандарте ИСО 21365 и других стандартах ИСО в серии «Качество почв» под термином «рецептор» понимается «определенный объект, уязвимый к неблагоприятному воздействию(ям) опасного вещества или фактора» [11]. В настоящей статье использована транслитерация этого термина на русский язык, термин понимается в приведенном выше значении [In ISO 21365 and other ISO standards in the Soil Quality series, the term “receptor” refers to “a specific object that is vulnerable to the adverse effect(s) of a hazardous substance or factor” [11]. This article uses the transliteration of this term into Russian, the term is understood in the meaning given above. (In Russ.)].

<sup>5</sup> 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 (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 (hereinafter – NRB-99/2009). (In Russ.)]; 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 [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. (In Russ.)]

будущего использования земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением для определения путей воздействия и расчета доз облучения отдельных лиц и групп пользователей.

### Материалы и методы

В работе рассмотрены 3 объекта: бывшая площадка АО «ВНИИХТ» (ныне Московский филиал ФГУП «РАДОИ») в г. Москве по адресу: Каширское шоссе, д. 33; 2 площадки Радиового института им. В.Г. Хлопина в г. Санкт-Петербурге по адресу: 2-й Мушинский пр., д. 28 (площадка № 1) и ул. Рентгена, д. 1 (площадка № 2). Будущее использование площадок ОИАЭ определялось на основе действующих концепций ВЭ с учетом местоположения земельных участков, их инвестиционной привлекательности, наличия градостроительных и иных ограничений.

Для каждого объекта определены группы потенциальных пользователей. В зависимости от характера их деятельности (проживание, работа в офисе или на улице, кратковременное пребывание) устанавливались значения расчетных параметров: длительность нахождения на участке, нахождение в помещении или на открытом воздухе, активная или спокойная деятельность. При определении значений проводилось сравнение с некоторыми калькуляторами, представленными в [13]. Например, в зарубежных расчетных программах типичными значениями длительности пребывания являются 250 дней в году (8 ч/сут) для работника и 350 дней в году (24 ч/сут) для жителя. Для работников нами приняты аналогичные значения, в случае жителя выбран более консервативный вариант – нахождение на участке все 365 дней в году.

В логике КМП предполагается рассмотрение всех путей облучения, включая: 1) внешнее облучение; 2) пероральный путь; 3) ингаляционный путь; 4) взаимодействие с кожными покровами. Далее определяются завершённые пути (где есть связь «источник – путь – рецептор») и незавершённые пути (где отсутствует один из этих элементов). Для каждой группы пользователей в расчетах учитывались только завершённые пути, обусловленные сценариями. Например, вследствие нахождения объектов в городе нами не рассматривался путь поступления

радионуклидов с питьевой водой из скважины, расположенной на земельном участке.

Исходными данными для расчетов послужили материалы исследований на территориях расположения площадок, выполненные в разные годы, и результаты комплексных инженерно-радиационных обследований объектов. Для оценок долговременной безопасности и расчетов в рамках ряда сценариев было выполнено прогнозное геомиграционное моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде с использованием расчетного кода GeRa [17]. Расчетные модели верифицированы по результатам радиационного мониторинга территории площадок и районов их размещения, выполняемого по отраслевым стандартам в составе экологического мониторинга окружающей среды на предприятиях и в организациях Государственной корпорации «Росатом». Расчеты доз облучения населения проводились с помощью программного модуля «Экорад-Аква», в основе которого лежат подходы МАГАТЭ к оценке радиационного воздействия на человека и миграции радионуклидов по пищевым цепочкам [18–20]. Результаты прогнозных расчетов сравнивались с пределами доз облучения населения, установленными НРБ-99/2009. Оценивалась возможность применения разработанных сценариев для других земельных участков с аналогичным видом использования.

### Результаты и обсуждение

*Сценарии для площадки АО «ВНИИХТ».* Предполагаемым вариантом будущего использования определено строительство жилых и административных зданий. В качестве пользователей рассмотрены: житель многоквартирного дома; работник офиса; строительный рабочий (табл. 1). Во всех 3 сценариях нахождение на открытом воздухе подразумевает, что рецептор находится на поверхности земли после проведения выемки загрязненного грунта, но до засыпки чистым материалом или обустройства твердого покрытия. Сезонный фактор (наличие снежного покрова) не учитывается. В силу указанных особенностей сценарные условия являются консервативными, а сами сценарии – упрощенными.

Выбранные параметры в целом согласуются с используемыми в зарубежных расчетных программах [13].

Параметры для расчетов по 3 упрощенным сценариям для площадки АО «ВНИИХТ»

Таблица 1

Parameters for calculations for 3 simplified scenarios for JSC «VNIIXT» site

[Table 1]

Параметры [Parameters]	Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]
Время нахождения в помещении (ч/год) [Time spent indoors (hour/year)]	8030	2000	250
Фактор экранирования в помещении (по отношению к мощности дозы на открытом воздухе) [Shielding factor (with regard to dose rate outdoors)]	0,5	0,5	0,9
Внешнее облучение (время нахождения на открытом воздухе, ч/год) [External exposure (Time spent outdoors (hour/year))]	730	125	2000
Внутреннее облучение (пероральный путь для почвы) [Internal exposure (soil ingestion)]			
– мг/сут [mg/day]	40	20	300
– г/год [g/year]	15	5	75

Параметры [Parameters]	Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]
Внутреннее облучение (ингаляционный путь для пыли) [Internal exposure (dust inhalation)]			
объем воздуха [air volume]			
– м <sup>3</sup> /ч [m <sup>3</sup> /hour]	0,9	1,0	1,3
– м <sup>3</sup> /год [m <sup>3</sup> /year]	7900	2125	3000
поступление пыли [dust intake]			
– мг/м <sup>3</sup> [mg/m <sup>3</sup> ]	0,1	0,1	0,4
– г/год [g/year]	0,8	0,2	1,2

При разработке сценария «Строительный рабочий» нами предварительно было определено, что пероральным путем поступает 100 мг почвы в сутки, что оказалось заниженной оценкой, исходя из предполагаемых условий работ и в сравнении с зарубежными калькуляторами. В RESRAD-ONSITE значение для взрослого индивида составляет 36,5 г/год из расчета 365 дней, в калькуляторах PRG и DCC – 25 и 82,5 г/год для работника на открытом воздухе и строительного рабочего соответственно. В итоговом сценарии нами принято значение 300 мг/сут (75 г/год). В сценарии «Житель» для этого пути установлено значение 40 мг/сут (значение годового поступления указано округленно), в сценарии «Работник офиса» – 20 мг/сут, что, с учетом малого времени пребывания на открытом воздухе, представляется консервативной оценкой.

Расчет ингаляционного поступления может проводиться на основе усредненных значений или же с детализацией по полу, возрасту, характеру физической активности. В DCC объем вдыхаемого воздуха по умолчанию составляет для жителя и фермера 0,83 м<sup>3</sup>/ч, в RESRAD-ONSITE – 0,95 м<sup>3</sup>/ч (для промышленного рабочего – 1,3 м<sup>3</sup>/ч) [13]. В справочнике Агентства по охране окружающей среды США [21] приводятся, со ссылкой на Публикацию 23 МКРЗ, следующие значения: 22,8, 21,1 и 14,4 м<sup>3</sup>/сут для референтных мужчины, женщины и ребенка соответственно, при этом предполагается 8-часовой сон и 16 ч легкой активности (для взрослых это 8 ч работы и 8 ч остальных занятий). Первоначально нами были определены значения в 0,8, 0,9 и 1 м<sup>3</sup>/ч для сценариев «Житель», «Работник офиса» и «Строительный рабочий» соответственно, в итоговых сценариях они пересмотрены в сторону увеличения. Поступление в органы дыхания пыли, поднимающейся с поверхности земли, консервативно принято в значениях мг/м<sup>3</sup> вдыхаемого воздуха (без разделения на нахождение на открытом воздухе и в помещении, без учета сезонности, метеорологии и других условий). Значения годового объема вдыхаемого воздуха и поступления пыли (с учетом типичного содержания пыли в городах Российской Федерации [22]) в таблице 1 даны округленно.

Путь облучения, связанный с кожными покровами, зависит от наличия значимых для этого пути радионуклидов и условий конкретной площадки. В упрощенных сценариях этот путь не рассматривался. Также в упрощенных сценариях не рассматривался ингаляционный путь для радона в помещениях, поскольку вопросы ограничения облучения радоном должны решаться путем соответствия значениям, установленным п. 5.3.2 НРБ-99/2009 и пп. 5.1.3, 5.1.6 ОСПОРБ 99/2010 для новых зданий.

На территории площадки с 2008 по 2020 г. силами АО «ВНИИХТ» и ФГУП «РАДОН» проводились работы по комплексному инженерному и радиационному обследованию (КИРО). В различные годы также осуществлялись мероприятия по реабилитации загрязненных участков. На всех реабилитированных участках мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения составляет менее 0,3 мкЗв/ч. Для проведения расчетов были проанализированы результаты проведенной в 2020 г. пешеходной гамма-съемки территории и глубинного обследования участка площадью 0,89 га (методом гамма-каротажа скважин и анализа проб). Максимальное значение МАЭД гамма-излучения составило 0,6 мкЗв/ч, отмечена значительная неравномерность распределения радионуклидов по глубине грунта. Анализ данных показал, что полученная информация не позволяет в полной мере оценить объем загрязненного грунта на площадке, требуется проведение дополнительных изысканий. В связи с имеющейся неопределенностью расчеты доз облучения по 3 упрощенным сценариям были проведены по каждому пути облучения, исходя из значений удельной активности в грунте 100 Бк/кг для радионуклидов <sup>241</sup>Am, <sup>137</sup>Cs, <sup>226</sup>Ra, <sup>90</sup>Sr, <sup>232</sup>Th, <sup>235</sup>U и <sup>238</sup>U (в таблице 2 для примера представлены данные расчетов для <sup>137</sup>Cs и <sup>235</sup>U, которые дают наибольшие значения доз суммарно по всем путям). Полученные соотношения «концентрация – доза» могут использоваться для уточнения результатов расчета после детальной характеристики площадки, а также для расчетов в рамках других сценариев.

Сценарии были также использованы для расчета значений удельной активности радионуклидов в грунте, соответствующих годовой эффективной дозе в 0,1 мЗв/год (табл. 3). Такие значения удобны для использования в качестве справочных при характеристике земельных участков и определении критериев конечного состояния. Необходимо подчеркнуть, что расчет доз от загрязнения грунта на конкретном участке базируется на результатах измерений, при этом уровни загрязнения в разных его частях могут различаться. Реалистичные оценки учитывают это обстоятельство, равно как и неопределенность уровней загрязнения при ограниченных объемах исследований. Когда же идет обратный пересчет доз в удельную активность, то предполагается равномерное загрязнение грунта по глубине и площади от одного радионуклида.

Сценарии для АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина». ВЭ объектов на площадках № 1 и № 2 планируются по варианту ликвидации (немедленного демонтажа) без сноса зданий. При разработке сценариев

Таблица 2

**Оценка эффективных доз облучения по 3 упрощенным сценариям при удельной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>235</sup>U в грунте 100 Бк/кг, мЗв/год**

[Table 2]

**Assessment of effective doses for 3 simplified scenarios at 100 Bq/kg activity concentration of <sup>137</sup>Cs and <sup>235</sup>U in soil, mSv/year**

Радионуклид [Radionuclide]	Путь облучения [Exposure pathway]	Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]
<sup>137</sup> Cs	Внешнее облучение: [External exposure]			
	на открытом воздухе [outdoors]	1,1·10 <sup>-2</sup>	1,9·10 <sup>-3</sup>	2,9·10 <sup>-2</sup>
	в помещении [indoors]	5,9·10 <sup>-2</sup>	1,5·10 <sup>-2</sup>	3,3·10 <sup>-3</sup>
	Пероральный путь [Ingestion]	2·10 <sup>-8</sup>	6,5·10 <sup>-9</sup>	9,8·10 <sup>-8</sup>
	Ингаляционный путь [Inhalation]	3,7·10 <sup>-10</sup>	9,2·10 <sup>-11</sup>	5,5·10 <sup>-10</sup>
	Всего [Total]	7·10 <sup>-2</sup>	1,7·10 <sup>-2</sup>	3,3·10 <sup>-2</sup>
<sup>235</sup> U	Внешнее облучение: [External exposure]			
	на открытом воздухе [outdoors]	2,7·10 <sup>-3</sup>	4,7·10 <sup>-4</sup>	7,5·10 <sup>-3</sup>
	в помещении [indoors]	1,5·10 <sup>-2</sup>	3,7·10 <sup>-3</sup>	8,4·10 <sup>-4</sup>
	Пероральный путь [Ingestion]	7,1·10 <sup>-8</sup>	2,4·10 <sup>-8</sup>	3,5·10 <sup>-7</sup>
	Ингаляционный путь [Inhalation]	2,5·10 <sup>-7</sup>	6,2·10 <sup>-8</sup>	3,7·10 <sup>-7</sup>
	Всего [Total]	1,8·10 <sup>-2</sup>	4,2·10 <sup>-3</sup>	8,3·10 <sup>-3</sup>

Таблица 3

**Удельная активность радионуклидов в грунте, формирующая годовую эффективную дозу облучения 0,1 мЗв в соответствии с упрощенными сценариями, Бк/кг**

[Table 3]

**Activity concentration of radionuclides in soil resulting in annual effective dose of 0.1 mSv with regard to simplified scenarios, Bq/kg**

Радионуклид [Radionuclide]	Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]
<sup>241</sup> Am	3·10 <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>4</sup>	6,5·10 <sup>3</sup>
<sup>137</sup> Cs	1,4·10 <sup>2</sup>	5,9·10 <sup>2</sup>	3·10 <sup>2</sup>
<sup>226</sup> Ra	1,3·10 <sup>4</sup>	5,5·10 <sup>4</sup>	2,8·10 <sup>4</sup>
<sup>90</sup> Sr	2,9·10 <sup>5</sup>	1,2·10 <sup>6</sup>	6,2·10 <sup>5</sup>
<sup>232</sup> Th	1,5·10 <sup>5</sup>	6,3·10 <sup>5</sup>	2,8·10 <sup>5</sup>
<sup>235</sup> U	5,6·10 <sup>2</sup>	2,4·10 <sup>3</sup>	1,2·10 <sup>3</sup>
<sup>238</sup> U	1,5·10 <sup>5</sup>	6,3·10 <sup>5</sup>	3,2·10 <sup>5</sup>

принято, что разрешенным использованием земельных участков будет размещение производственных, научных, административных зданий, строений, сооружений и обслуживающих их объектов. Для площадки № 1 так-

же рассматривается возможность размещения жилых зданий.

Исходя из указанных предпосылок, к площадке № 1 применимы все 3 сценария, разработанные для площад-

ки АО «ВНИИХТ», к площадке № 2 – сценарий «Работник офиса». Дополнительно для обеих площадок также предложен сценарий для работника, который находится вне помещений (условное название – «Охранник»). «Охранник» проводит 2000 ч в год на открытом воздухе без ведения активной деятельности (параметры для ингаляционного пути аналогичны сценарию «Работник офиса»). Для упрощения расчетов исключается нахождение во временном сооружении легкой конструкции (типа будки, навеса и т.п.). С учетом компактности площадок и использования твердых покрытий на большей их части пероральный путь для почвы оставлен только для сценариев, связанных с разрытием грунта.

На территории площадки №1 в 2012–2015 гг. силами ОАО «ВНИПИЭТ» и АО «Радиевый институт» были выполнены работы по комплексному инженерному и радиационному обследованию. Согласно результатам КИРО, территория не имеет значительных участков радиоактивного загрязнения, в то же время выявлено остаточное загрязнение грунтов по глубине, которое характеризуется неоднородным и разнообразным радионуклидным составом. В 2019 г. был проведен объектный мониторинг состояния недр (ОМСН) на площадках, проведена гамма-съемка. Диапазон значений МАЭД гамма-излучения составил 0,11–0,32 мкЗв/ч. Загрязнение грунта обусловлено  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ .

Для расчетов сделано консервативное предположение, что пользователи испытывают радиационное воздействие от наиболее загрязненного участка площадью 100 м<sup>2</sup>. Уровни загрязнения других частей площадки значительно ниже. В силу этого дозы облучения (табл. 4) завышены для всех пользователей и могут служить верхней границей дозовых оценок до проведения реабилитации. Более 95% вклада в дозу облучения приходится на  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{134}\text{Cs}$ . При заданных условиях годовая эффективная доза облучения превышает установленный НРБ-99/2009 предел доз для населения для сценария «Житель». Поскольку сценарий с проживанием может быть реализован только после окончания работ по ВЭ ОИАЭ и завершения нового строительства, фактическая дозовая нагрузка для этой группы пользователей будет многократно снижена.

На территории площадки № 2 в 2016 г. выполнено расширение существующей системы ОМСН, в результа-

те чего на площадке № 2 создана система мониторинга недр, пробы подземных вод и грунта отобраны и исследованы в лабораториях АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина». В 2013 и 2019 гг. силами ОАО «ВНИПИЭТ» и АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» были выполнены КИРО. В 2019 г. в рамках КИРО в двух шурфах было отобрано 8 проб грунта и 1 проба грунтовой воды. Основными загрязняющими радионуклидами являлись  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Диапазон значений МАЭД гамма-излучения составлял 0,13–0,27 мкЗв/ч, исследование проводилось по регулярной сетке с шагом 10 м. В итоге выделено 6 участков вероятного загрязнения, на которых необходимо провести бурение и послыйный отбор проб грунта для оценки уровней и равномерности загрязнения. В связи с тем, что на момент проведения геомиграционного моделирования отсутствовали точные данные о фактическом содержании радионуклидов по каждому участку, задача консервативно решалась с предположением о содержании радионуклидов в грунте на уровне их отнесения к радиоактивным отходам.

К площадке № 2 не применим сценарий «Строительный рабочий», т.к. здания относятся к объектам культурного наследия, что исключает их снос. Для учета вклада перорального и ингаляционного пути для данной площадки предложен сценарий «Бурильщик» (как альтернатива сценарию «Строительный рабочий»). Работник находится на открытом воздухе в теплое время года в течение 200 ч (8-часовой рабочий день в течение 5 недель) и занят работами, связанными со вскрытием твердых поверхностей (ремонт коммуникаций, прокладка линий связи и т.п.). Результаты расчетов показали, что дозы облучения для указанных групп пользователей будут определяться в основном внешним облучением от поверхности земли (табл. 5). При заданных условиях дозы облучения для работников, постоянно находящихся на территории, превышают установленные пределы доз для населения. Более 95% вклада приходится на  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{235}\text{U}$ .

В условиях неопределенности картины загрязнения под фундаментами зданий площадки № 2 была поставлена задача оценки доз облучения, связанного с миграцией радионуклидов. Подземные воды в районе площадки не являются источниками питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, поэтому для решения задачи был

Таблица 4

Оценка эффективных доз облучения по 4 сценариям для площадки № 1 Радиевого института им. В.Г. Хлопина, мЗв/год [Table 4]

Assessment of effective doses for 4 scenarios for V.G. Khlopin Radium Institute site № 1, mSv/year

Пути облучения [Exposure pathways]		Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]	Охранник [Security guard]
Внутреннее облучение [Internal exposure]	Ингаляционный путь [Inhalation]	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$9,29 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$
	Пероральный путь [Ingestion]	–	–	$2,97 \cdot 10^{-5}$	–
Внешнее облучение [External exposure]	На открытом воздухе [Outdoors]	0,3	$5,12 \cdot 10^{-2}$	0,91	0,91
	В помещении [Indoors]	1,7	0,41	$5,71 \cdot 10^{-2}$	–
Всего [Total]		1,95	0,46	0,97	0,91

Оценка эффективных доз облучения по 3 сценариям для площадки № 2 Радиевого института им. В.Г. Хлопина, мЗв/год

Таблица 5

[Table 5]

Assessment of effective doses for 3 scenarios for V.G. Khlopin Radium Institute site № 2, mSv/year

Пути облучения [Exposure pathways]	Работник офиса [Office worker]	Бурильщик [Driller]	Охранник [Security guard]	
Внутреннее облучение [Internal exposure]	Ингаляционный путь [Inhalation]	1,03·10 <sup>-4</sup>	5,12·10 <sup>-5</sup>	9,65·10 <sup>-5</sup>
	Пероральный путь [Ingestion]	–	6,8·10 <sup>-5</sup>	–
Внешнее облучение [External exposure]	На открытом воздухе [Outdoors]	0,24	0,38	3,78
	В помещении [Indoors]	1,9	–	–
Всего [Total]	2,13	0,38	3,78	

разработан отдельный сценарий с условным названием «Сантехник». «Сантехник» работает в коллекторе 1 ч в день в течение года (всего 250 ч в год). Через неплотности и микротрещины в коллектор попадает некоторое количество загрязненных вод (в расчетах принято значение 1 л/год). Предполагается, что содержащиеся в воде радионуклиды осели на дно коллектора на сравнительно небольшой площади, на которой работает сантехник. Для данного сценария по результатам проведенного геомиграционного моделирования с учетом цепочек распада для каждого дозообразующего радионуклида выполнены дозовые оценки для пиковых значений активностей, приходящихся для различных радионуклидов на различные временные периоды (табл. 6). Оценка доз носит иллюстративный характер, более точные расчеты могут быть произведены после получения реальных входных данных.

Расчетами по площадкам АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» показано, что дозы облучения для сценария «Охранник» близки комбинации доз для сценариев «Строительный рабочий» (по дозе внешнего облучения) и «Работник офиса» (по ингаляционному пути). Таким образом, сценарий «Охранник» при наличии 2 других не является информативным. Хотя формально сценарий «Строительный рабочий» не применим к площадке № 2, его основные параметры с определенной корректировкой можно использовать для работника, который посто-

янно находится на открытом воздухе и занят работами по обслуживанию территории. Типовой сценарий с условным названием «Разнорабочий» сможет заменить частные сценарии «Охранник» и «Бурильщик».

Полученные результаты расчетов для площадок № 1 и № 2 могут быть в дальнейшем уточнены при получении дополнительных сведений о фактическом загрязнении, в том числе с учетом выполняемых работ по ВЭ ЯРОО, удалению загрязненного грунта и обустройству твердых покрытий. Предварительные дозовые оценки могут быть использованы для выбора и обоснования мероприятий по снижению радиационного воздействия, а также определения критериев конечного состояния площадок. Например, при использовании на территории площадок значения МАЭД гамма-излучения менее 0,3 мкЗв/ч в качестве одного из критериев конечного состояния (предполагая, что эта величина наполовину обусловлена остаточной радиоактивностью), доза дополнительного внешнего облучения для сценария с нахождением на открытом воздухе составит не более 0,3 мЗв/год.

**Заключение**

Полученные результаты показали, что разработка сценариев облучения на основе КМП позволяет в должной мере учесть условия мест размещения ОИАЭ и особенности текущего и будущего использования занимае-

Оценка эффективных доз облучения на площадке № 2 Радиевого института им. В.Г. Хлопина для сценария «Сантехник», мкЗв/год

Таблица 6

[Table 6]

Assessment of effective doses for V.G. Khlopin Radium Institute site № 2 for «Plumber» scenario, µSv/year

Период, годы [Time, years]	<sup>90</sup> Sr+ <sup>137</sup> Cs	<sup>237</sup> Np	<sup>226</sup> Ra	<sup>222</sup> Rn+ДПР [ <sup>222</sup> Rn+progeny]	<sup>210</sup> Pb	<sup>235</sup> U	<sup>242</sup> Pu
50–150	4·10 <sup>-9</sup>	–	–	–	–	–	–
550–600	–	0,48	–	–	–	–	–
1450–1500	–	–	370	600	0,56	–	–
2950–3000	–	–	–	–	–	10	–
35 000	–	–	–	–	–	–	0,003

мых ими земельных участков. Степень консервативности расчетов доз облучения зависит от неопределенности данных, характеризующих радиационный статус участков и принятых в этой связи допущений. Выполненные оценки демонстрируют вклад путей облучения и отдельных радионуклидов в общую дозовую нагрузку и имеют существенный запас прочности. При получении более точных входных данных расчеты могут быть скорректированы по уже разработанным алгоритмам, т.е. без существенных усилий.

Результаты также продемонстрировали трудности разработки типовых сценариев облучения. Сценарии «Работник офиса» и «Строительный рабочий» являются универсальными и могут быть применены на различных площадках: в дальнейшем сценарий «Работник офиса» целесообразно использовать для более общих случаев работы в помещениях (административных, промышленных и др.), а сценарий «Строительный рабочий» – также для персонала, занятого сооружением инженерных барьеров на объектах ядерного наследия. Сценарий «Житель» может считаться типовым для условий проживания в городе. Для работника, чья деятельность проходит на открытом воздухе, требуется, по-видимому, сформировать типовой сценарий с условным названием «Разнорабочий», объединив и дополнив сценарии «Охранник» и «Бурильщик». Сценарий «Разнорабочий» может быть использован для распространенных случаев деятельности на территории, связанной с ее уборкой, обслуживанием и благоустройством, и будет учитывать пероральный и ингаляционный пути поступления радионуклидов. Для ряда площадок потребуется разработка сценария, связанного с рекреационным использованием территории.

Оценки доз облучения на основе сценариев дают полезную информацию для обоснования принимаемых решений по ВЭ и реабилитации. Подходы к их разработке могут использоваться для обоснованной оценки доз облучения населения и персонала, а в перспективе и для отдельных видов биоты от остаточной радиоактивности на площадках выводимых из эксплуатации объектов использования атомной энергии и других загрязненных участках. Инструментарий КМП и адаптированные под задачу алгоритмы, необходимые для расчета миграции радионуклидов и оценки дозовых нагрузок на различные группы населения, дают возможность на этапе проектирования оценить эффективность тех или иных решений по ВЭ и реабилитации, когда известны варианты будущего использования земельных участков. Результаты расчетов могут служить основой для экспресс-оценок радиационной обстановки, определения вклада различных путей в дозы облучения, обоснования вариантов проведения работ и определения критериев конечного состояния. Возможна быстрая адаптация разработанных сценариев под условия конкретных площадок. В дальнейшем целесообразно выбрать типовые сценарии облучения с закреплением в методических документах в качестве рекомендаций для проведения расчетов на предварительных этапах характеристики площадок, а также при обосновании вариантов проведения работ, разработке проектов ВЭ ЯРОО и реабилитации территорий.

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

Абалкина И.Л. разработала сценарии облучения при будущем использовании земельных участков, подготовила текстовый вариант статьи.

Аракеян А.А. выполнил расчеты доз облучения с помощью программного модуля «Экорад-Аква».

Муленкова Е.В. разработала модель миграции нуклидов в границах ближней зоны площадки АО «ВНИИХТ» и трехмерную геомиграционную модель площадки № 1 Радиевого института им. В.Г.Хлопина, выполнила геомиграционное моделирование.

Самойлов А.А. осуществил постановку задач и вел общее руководство исследовательской работой.

Панченко С.В. подготовил исходные данные для расчетов доз облучения.

Ширнин М.Ю. разработал трехмерные геомиграционные модели и выполнил геомиграционное моделирование для площадки АО «ВНИИХТ», площадки № 2 Радиевого института им. В.Г. Хлопина.

### **Информация о конфликте интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Сведения об источнике финансирования**

Финансирование работы осуществлялось по государственным контрактам № Д.4ш.244.20.19.1046 от 26.07.2019 г. и № Д.4ш.244.20.21.1135 от 06.07.2021 г. с Госкорпорацией «Росатом».

### **Литература**

1. Reuse Assessments: A Tool To Implement The Superfund Land Use Directive. OSWER 9355.7-06P. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2001. 24 p. URL: <https://clu-in.org/download/toolkit/thirdednew/reuseassesstool.pdf> (дата обращения: 24.01.2023).
2. Considering Reasonably Anticipated Future Land Use and Reducing Barriers to Reuse at EPA-lead Superfund Remedial Sites. OSWER 9355.7-19. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2010. 14 p. URL: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175563.pdf> (дата обращения: 24.01.2023).
3. Use of Risk-Based End States. Policy DOE P 455.1. Washington D.C.: U.S. Department of Energy, 2003. 4 p. URL: <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0455.1-APolicy/@images/file> (дата обращения: 24.01.2023).
4. Management of soils contaminated by the activities of Basic Nuclear Installations. ASN Guide No. 24, Version of 08/30/2016. 30 p. URL: <https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-regulates/asn-guides/asn-guide-no.-24> (дата обращения: 23.01.2023).
5. Абалкина И.Л., Панченко С.В. Концептуальная модель площадки как пример лучших практик в области реабилитации. Препринт № IBRAE-2020-02. М.: ИБРАЭ РАН, 2020. 49 с.
6. Абалкина И.Л., Панченко С.В.. Концептуальная модель площадки как инструмент планирования работ по реабилитации // Вопросы радиационной безопасности. 2020. № 2(98). С. 3–11.
7. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. Том 1 / под общ. ред. И.И. Линге и А.А. Абрамова. М.: ИБРАЭ РАН, 2017. 366 с.
8. Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites. ASTM International E1689-95(2008). 9 p.

9. Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model. EPA 542-F-11-011. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2011. 12 p. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/csm-life-cycle-fact-sheet-final.pdf> (дата обращения: 23.01.2023).
10. Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model. Version 1.1. New Jersey Department of Environmental Protection, 2019. 46 p. URL: [https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/csm\\_tech\\_guidance.pdf](https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/csm_tech_guidance.pdf) (дата обращения: 23.01.2023).
11. ISO/DIS 21365. Soil quality – Conceptual site models for potentially contaminated sites. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21365:dis:ed-1:v1:en> (дата обращения: 23.01.2023).
12. Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Events. IAEA Safety Standards Series No. GSG-15. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. 201 p.
13. Shubayr N. Overview of Radiation Risk and Dose Assessment Models for Radioactively Contaminated Sites and Selected Default Input Parameters. U.S. Environmental Protection Agency, ORISE, 2017. 73 p. URL: [https://epa-prgs.ornl.gov/radionuclides/Overview\\_of\\_Rad\\_R.A.Ms.pdf](https://epa-prgs.ornl.gov/radionuclides/Overview_of_Rad_R.A.Ms.pdf) (дата обращения: 23.01.2023).
14. Абалкина И.Л., Панченко С.В., Савкин М.Н., и др. Социально и экологически приемлемые критерии реабилитации загрязненных территорий пунктов размещения особых радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 3(87). С. 46–52.
15. Романович И.К., Стамат И.П., Санжарова Н.И., Панов А.В. Критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности: Часть 1. Выбор показателей для обоснования критериев реабилитации // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-6-15.
16. Голиков В.Ю., Романович И.К.. Обоснование радиологических критериев использования территорий с остаточным радиоактивным загрязнением на основе дозового подхода // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 6–22. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-6-22.
17. Капырин И.В. Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2. С. 105–115. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-105-118.
18. Аракелян А.А., Блохин А.И., Блохин П.А., и др. Развитие программного комплекса КОРИДА и опыт его применения при решении задач обращения с ОЯТ и РАО // Радиоактивные отходы. 2022. № 3. С. 107–116. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-107-116.
19. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series No. 472. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 194 p.
20. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 477 с.
21. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). EPA/600/R-09/052F. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2011. 62 p. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/efh-frontmatter.pdf> (дата обращения: 24.01.2023).
22. Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2021 г.». СПб.: ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2022. 254 с. URL: <http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikaci/40-perechen-materialov-izdannyykh-ggo> (дата обращения: 24.01.2023).

Поступила: 27.03.2023 г.

**Абалкина Ирина Леонидовна** – кандидат экономических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. **Адрес для переписки:** 115191, Москва, ул. Б. Тульская, д. 52; e-mail: [abalkina@ibrae.ac.ru](mailto:abalkina@ibrae.ac.ru)

**Аракелян Арам Айкович** – научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

**Муленкова Екатерина Викторовна** – руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

**Самойлов Андрей Анатольевич** – старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

**Панченко Сергей Владимирович** – заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

**Ширнин Михаил Юрьевич** – инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

**Для цитирования:** Абалкина И.Л., Аракелян А.А., Муленкова Е.В., Самойлов А.А., Панченко С.В., Ширнин М.Ю. Разработка сценариев облучения населения для земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 91-101. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-91-101

## Development of public exposure scenarios for land sites with residual radioactive contamination

Irina L. Abalkina, Aram A. Arakelyan, Ekaterina V. Mulenikova, Andrey A. Samoylov, Sergey V. Panchenko, Mikhail Yu. Shirnin

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences

*The article considers the experience of development of public exposure scenarios for land sites with residual radioactive contamination on the example of three sites located in Moscow and St. Petersburg. The study was intended to identify the anticipated groups of land users and select parameters for calculating radiation doses. Exposure scenarios regarding use of land sites for living or working were described by such parameters as duration of the stay, staying indoors or outdoors, physical activity, etc. Exposure pathways for selected users were identified using the conceptual site model approach. For calculations within a number of scenarios, geomigration modeling of radionuclide transport in the environment was performed using the GeRa code. Exposure doses for population groups were calculated using the Ecorad-Aqua software module. Doses were calculated for each exposure pathway. The study demonstrates that the proposed scenario "Office worker" can be applied to various sites that are planned for placing administrative, industrial, scientific, commercial buildings and structures, scenario "Construction worker" – for sites with construction and excavation activities underway. The parameters of the "Resident" scenario allow for its application for the multi-apartment residential development in large cities. In the future, it is practical to develop a typical scenario for an outdoor worker whose activity is to provide care and maintenance of the site. These scenarios can be used as ready-made solutions for calculating radiation doses for the population from residual radioactivity at the nuclear sites under decommissioning and remediated areas. Estimates of annual effective doses for the population are needed for decommissioning and remediation planning and determination of the values of radiation factors in the relevant projects.*

**Key words:** residual radioactive contamination, exposure scenario, anticipated future land use, conceptual site model, exposure pathway, radiation dose, decommissioning, remediation.

### Personal participation of the authors

I.L. Abalkina developed exposure scenarios regarding future use of land sites, prepared a text version of the paper.

A.A. Arakelyan performed radiation dose calculations using software module «Ecorad-Aqua».

E.V. Mulenikova developed migration model of near zone for JSC "VNIИHT" site and three-dimensional geomigration model of Khlopin Radium Institute site № 1, performed computations.

A.A. Samoylov carried out the setting of tasks and supervised the research.

S.V. Panchenko prepared input data for radiation dose calculations.

M.Yu. Shirnin developed three-dimensional geomigration models and performed computations for JSC "VNIИHT" site, Khlopin Radium Institute site № 2.

### Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

### Funding sources

The work was funded under state contracts No. D.4sh.244.20.19.1046 dated July 26, 2019 and No. D.4sh.244.20.21.1135 dated July 6, 2021 with State corporation «Rosatom».

### References

1. Reuse Assessments: A Tool To Implement The Superfund Land Use Directive. OSWER 9355.7-06P. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2001. 24 p. Available from: <https://clu-in.org/download/toolkit/thirdednew/reuseassess-tool.pdf> (Accessed 24 Jan 2023).
2. Considering Reasonably Anticipated Future Land Use and Reducing Barriers to Reuse at EPA-lead Superfund Remedial Sites. OSWER 9355.7-19. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2010. 14 p. Available from: <https://sems-public.epa.gov/work/HQ/175563.pdf> (Accessed 24 Jan 2023).
3. Use of Risk-Based End States. Policy DOE P 455.1 Washington D.C.: U.S. Department of Energy; 2003. 4 p. Available from: <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0455.1-APolicy/@@images/file> (Accessed 24 Jan 2023).
4. Management of soils contaminated by the activities of Basic Nuclear Installations. ASN Guide No. 24, Version of 08/30/2016. 30 p. Available from: <https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-regulates/asn-guides/asn-guide-no.-24> (Accessed 23 Jan 2023).
5. Abalkina IL, Panchenko SV. Conceptual Site Model as an Example of Best Practices in Remediation. Preprint № IBRAE-2020-02. Moscow: Nuclear Safety Institute (IBRAE) RAS; 2020. 49 p. (In Russian).
6. Abalkina IL, Panchenko SV. Conceptual Site Model as an Instrument for Remediation Planning. *Voprosy radiatsionnoi*

**Irina L. Abalkina**

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences

**Address for correspondence:** 52 B. Tulsкая street, Moscow, 115191, Russia; E-mail [abalkina@ibrae.ac.ru](mailto:abalkina@ibrae.ac.ru)

- bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2020;2(98): 3–11. (In Russian).
7. Best Foreign Practices in Decommissioning of Nuclear Installations and Remediation of Contaminated Areas. Volume 1. Ed. by I.I. Linge and A.A. Abramov. Moscow: Nuclear Safety Institute (IBRAE) RAS; 2017. 366 p. (In Russian).
  8. Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites. ASTM International E1689-95(2008). 9 p.
  9. Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model. EPA 542-F-11-011. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2011. 12 p. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/csm-life-cycle-fact-sheet-final.pdf> (Accessed 23 Jan 2023).
  10. Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model. Version 1.1. New Jersey Department of Environmental Protection; 2019. 46 p. Available from: [https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/csm\\_tech\\_guidance.pdf](https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/csm_tech_guidance.pdf) (Accessed 23 Jan 2023).
  11. ISO/DIS 21365. Soil quality – Conceptual site models for potentially contaminated sites. Available from: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21365:dis:ed-1:v1:en>. (Accessed 23 Jan 2023).
  12. Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Events. IAEA Safety Standards Series No. GSG-15. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2022. 201 p.
  13. Shubayr N. Overview of Radiation Risk and Dose Assessment Models for Radioactively Contaminated Sites and Selected Default Input Parameters. U.S. Environmental Protection Agency, ORISE; 2017. 73 p. Available from: [https://epa-prgs.ornl.gov/radionuclides/Overview\\_of\\_Rad\\_R.A.Ms.pdf](https://epa-prgs.ornl.gov/radionuclides/Overview_of_Rad_R.A.Ms.pdf) (Accessed 23 Jan 2023).
  14. Abalkina I.L., Panchenko S.V., Savkin M.N., Vedernikova M.V., Kryshev I.I. Socially and Ecologically Acceptable Criteria for Remediation of Contaminated Areas of Non-Retrieveable Waste Facilities. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2017;87(3): 46–52. (In Russian).
  15. Romanovich I.K., Stamat I.P., Sanzharova N.I., Panov A.V. Criteria for rehabilitation of facilities and territories contaminated with radionuclides as a result of past activities: Part 1. The choice of indicators for justification of the criteria for rehabilitation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-6-15. (In Russian).
  16. Golikov V.Yu., Romanovich I.K. Justification for the radiological criteria for the use of areas with residual radioactive contamination based on the dose approach. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 6–22. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-6-22. (In Russian).
  17. Kapyrin I.V. Computational Codes for the Hydrogeological Modeling in the Safety Assessment of Nuclear Facilities. *Radioaktivnye Otkhody = Radioactive Waste*. 2022;2: 105–118. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-105-118. (In Russian).
  18. Arakelyan A.A., Blohin A.I., Blohin P.A., Vaneev Yu.E., Kazieva S.T., Kizub P.A., et al. Refinement of KORIDA Software Complex and its Application in Addressing SNF and RW Management Problems. *Radioaktivnye Otkhody = Radioactive Waste*. 2022;3: 107–116. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-107-116. (In Russian).
  19. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series No. 472. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2010. 194 p.
  20. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. IAEA safety standards series no. GSR Part 3. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. 436 p.
  21. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). EPA/600/R-09/052F. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2011. 62 p. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/efh-front-matter.pdf> (Accessed 24 Jan 2023).
  22. Yearbook “The state of atmospheric pollution in Russian cities in 2021”. St. Petersburg: FGBI “MGO”; 2022. 254 p. Available from: <http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikacii/40-perechen-materialov-izdannyykh-ggo> (Accessed 24 Jan 2023) (In Russian).

Received: March 27, 2023

**For correspondence:** Irina L. Abalkina – Candidate of Economic Sciences, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52 B. Tulsкая street, Moscow, 115191, Russia; E-mail [abalkina@ibrae.ac.ru](mailto:abalkina@ibrae.ac.ru))

**Aram A. Arakelyan** – Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Ekaterina V. Mulenkova** – Project Manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Andrey A. Samoylov** – Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Sergey V. Panchenko** – Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Mikhail Yu. Shirnin** – Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**For citation:** Abalkina I.L., Arakelyan A.A., Mulenkova E.V., Samoylov A.A., Panchenko S.V., Shirnin M.Yu. Development of public exposure scenarios for land sites with residual radioactive contamination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 91-101. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-91-101

## Урановые хвостохранилища г. Истиклола: история, проблемы, решения

Н.У. Хакимова, М.А. Зоитова

Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности  
Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Республика Таджикистан

*В статье дается обзор проблем, связанных с урановыми хвостохранилищами г. Истиклола. Многие объекты уранового наследия в Средней Азии до развала СССР не успели законсервировать, в том числе и урановые хвостохранилища г. Истиклола. Комплекс захоронений состоит из карьера, отвалов Фабрики бедных руд, незаконсервированной открытой шахты, разрушенных производственных зданий и 4 хвостохранилищ, содержащих 12 млн тонн отходов уранового производства. Мощность ambientной дозы гамма-излучения в районе хвостохранилищ составляет 0,5–0,6 мкЗв/ч, а в отдельных точках достигает 3,0–4,0 мкЗв/ч. Среднегодовая эмиссия радона с поверхности оценивается в  $3,9 \times 10^{11}$  Бк/год. К загрязненным территориям также относятся ручей Сарым-Сахлы Сай, шахтные, промышленные и карьерные воды, которые характеризуются повышенным содержанием  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{226}\text{Ra}$ . Объекты не имеют физических ограждений, что дает свободный доступ для населения и животных. Природные катаклизмы, такие как сели, оползни, землетрясения, могут привести к экологической катастрофе. Внимание уделено путям решения данных проблем: мониторингу радионуклидов в воде, почве, воздухе; работе с населением по его информированию и привлечению к реабилитационным работам; поиску инвесторов. Для минимизации радиационного воздействия на окружающую среду разработана и утверждена Правительством Республики Таджикистан «Программа реализации Национальной концепции по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2016–2024 годы». Для воплощения данной Программы нужны значительные финансовые вложения и обученный в области радиационной безопасности персонал. Только совместными усилиями государства, населения и международных организаций возможно проведение запланированных реабилитационных работ в полном объеме. Также одной из основных причин получения ненужного переоблучения населением являлась его неинформированность о вреде использования загрязненных радионуклидами воды, почвы, строительного материала. Поэтому культуру радиационной безопасности нужно прививать, начиная со школы, рассказывая о радиации и возможных путях облучения. Тогда случаев поступления радионуклидов в организм, которого можно было избежать, и радиофобии среди населения, живущего рядом с добычей и переработкой урановой руды, будет гораздо меньше. В статье также затронуты некоторые социальные и экономические аспекты решения обозначенных проблем.*

**Ключевые слова:** урановые хвостохранилища, радиоэкологические проблемы, рекультивация, Истиклол, информированность населения, радиационная безопасность.

### Введение

В конце 1940-х гг. на территории Средней Азии, в том числе Северного Таджикистана в Согдийской области шла усиленная добыча и переработка урановой руды для развития атомной отрасли СССР. Это привело к образованию большого количества радиоактивных отходов. Многие объекты уранового наследия в Средней Азии до крушения СССР не успели реабилитировать, что приводит к загрязнению окружающей среды и поступлению радионуклидов в организм людей и животных, живущих на прилегающих территориях. Одна из актуальных проблем – радиоэкологическая обстановка на урановых хвостохранилищах, расположенных вокруг г. Истиклола. Эти хвостохранилища расположены в межгорной долине

в условиях высокогорья, активного проявления экзогенных физико-геологических процессов и высокой сейсмичности. Часть хвостохранилищ и отвалов расположена в непосредственной близости от ручья Сарым-Сахлы Сай и в пределах населенных пунктов, что в совокупности с опасностью схода лавин, селей, оползней и землетрясений может привести к экологической катастрофе.

### История

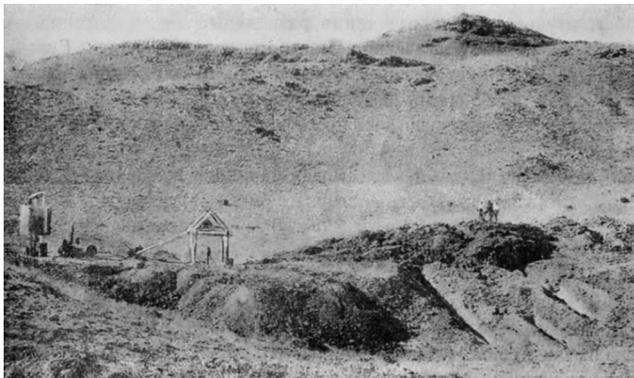
Город Истиклол (до 2012 г. – Табошар) с населением более 20 000 человек расположен на севере Таджикистана в Согдийской области всего в 0,5–4,0 км от мест расположения хранилищ. Табошарское урановое месторождение, расположенное на южных склонах

**Хакимова Ноди́ра Умаровна**

Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности

Адрес для переписки: 734025, Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 33; E-mail: nodirataj@mail.ru

Кураминского хребта, считавшееся одним из крупнейших на территории стран бывшего СССР, было открыто в 1925 г. геологом С.Ф. Машковцевым. С 1926 г. здесь начала работать первая геологоразведочная партия под руководством Б.Н. Наследова, и уже в 1927 г. геологом этой партии И.П. Новохатским была обнаружена крупная урановая жила «Ведущая» (рис. 1).



**Рис. 1.** Разведочные работы на «Ведущей» жиле Табошарского месторождения. Автор: Щербаков Д.И., 1933 г.  
**[Fig. 1.]** Exploration work on the «Leading» vein of the Taboshar field. Author: Shcherbakov D.I., 1933]

В период открытия месторождения были обнаружены только руды окисленной зоны. Руды более глубокого залегания, содержащие урановую чернь, были обнаружены лишь в 1937 г. [1, 2].

Еще в 1930–1931 гг. Гиредмет проводил исследования по извлечению радия из руд Табошарского месторождения. В 1934 г. на опытной химической установке в Табошаре под руководством профессора И.Я. Башилова велись исследования по технологии переработки этих руд и получения радия [3]. К 1935 г. были построены небольшой поселок, рудник и гидрометаллургический цех. В 1937 г. Табошар принимает статус поселка городского типа, который до распада Советского Союза был закрытым и значился как «Ленинабад-31». В 1941 г. в поселок Табошар был эвакуирован завод «В» Главного управления редких металлов Наркомцветмета, в составе которого были гидрометаллургический цех (завод № 4) и Одесский филиал Гиредмета для производства солей висмута, стронция и светящихся составов [4].

Когда руководству страны в конце 1942 г. стало известно о ведущихся в Германии, Великобритании и США работах по использованию энергии деления урана в военных целях, было принято решение организовать в СССР добычу урановой руды. 8 декабря 1944 г. ГКО принял решение о создании в Средней Азии крупного уранодобывающего предприятия на базе месторождений Таджикистана, Киргизии и Узбекистана и передаче руководства этими работами из Наркомцветмета в НКВД. Постановлением ГКО от 15 мая 1945 г. № 8582 сс/ов в системе НКВД СССР был организован первенец сырьевой отрасли атомной промышленности Советского Союза – Комбинат № 6, который располагался в г. Чкаловске Таджикской ССР (ныне г. Бустон) (с 1976 г. Ленинабадский горно-химический комбинат, с 1990 г. ГП «Востокредмет», с 2016 г. ГУП «Тадждредмет»). Он был создан на базе за-

вода «В» Главредмета, Табошарского, Адрасманского, Майлисуйского, Уйгурсайского и Тьюмюнского рудников для добычи и переработки урановых руд до закиси-оксида урана. Для создания советской атомной бомбы здесь велась активная добыча и переработка урановой руды с 1944 по 1965 г. Добыча урановых руд велась открытым и шахтным способами.

На базе Табошарского цеха был организован опытный завод № 3, который перерабатывал руду Табошарского, Адрасманского, Майлисуйского (Кыргызстан), Уйгурского (Узбекистан) месторождений с выпуском 40% уранового концентрата и производил доводку своих урановых концентратов и концентратов завода № 4 до технической закиси-оксида. К концу 1945 г. мощность переработки руды на заводе № 3 составляла 40 т в сутки, а на заводе № 4 – 25 т в сутки [5–7]. Реконструкция заводов позволила к концу 1946 г. увеличить производственную мощность до 50–60 тонн в сутки на заводе №4 и до 60–70 тонн в сутки на заводе №3 [6]. Кроме того, на эти заводы привозили обогащенные концентраты из Германии, Чехословакии, Эстонии и других стран. Никаких мер радиационной защиты тогда не предпринималось. На тот момент еще не были определены допустимые дозы облучения; только с середины 1950-х гг. начались интенсивные работы по разработке комплекса противопылевых и противорадионных мероприятий [2, 3].

В течение 1945–1949 гг. в Табошаре было построено два гидрометаллургических завода и два предприятия по добыче и переработке урановых руд. Хвостохранилища располагались непосредственно рядом с заводами, занимая обширную территорию общей площадью более 400 га.

К концу 1980-х гг., по мере отработки залежей урановых руд, производство продукции сократилось. Планировалось все хвостохранилища рекультивировать, но из-за распада СССР и начала в Таджикистане в 1992 г. гражданской войны они так и остались опасным наследием развития атомной промышленности.

Государственное управление урановой промышленностью в бывшем СССР было централизованным, оно принадлежало Министерству среднего машиностроения СССР, в состав которого входил и регулирующий орган в области радиационной безопасности. Регуляторные стандарты по радиационной безопасности, применявшиеся на тот момент, были сопоставимы с европейскими и американскими стандартами, существовавшими на период 1960-х и 1970-х гг. [8]. Но часто требования норм радиационной безопасности, к сожалению, скрывались или не выполнялись, поскольку первоочередное значение уделялось задаче повышения производительности добычи урана. Вопросам охраны окружающей среды также не уделялось должного внимания.

### Описание хвостохранилищ

Комплекс захоронений состоит из карьера, отвалов Фабрики бедных руд (ФБР), незаконсервированной открытой шахты, разрушенных производственных зданий и 4 хвостохранилищ: хвостохранилища I–II, хвостохранилища III, хвостохранилища IV очередей и хвостохранилища в производственном цехе № 3 (рис. 2), содержащих почти 55 млн тонн отходов, из которых около 12 млн тонн составляют отходы уранового производства.

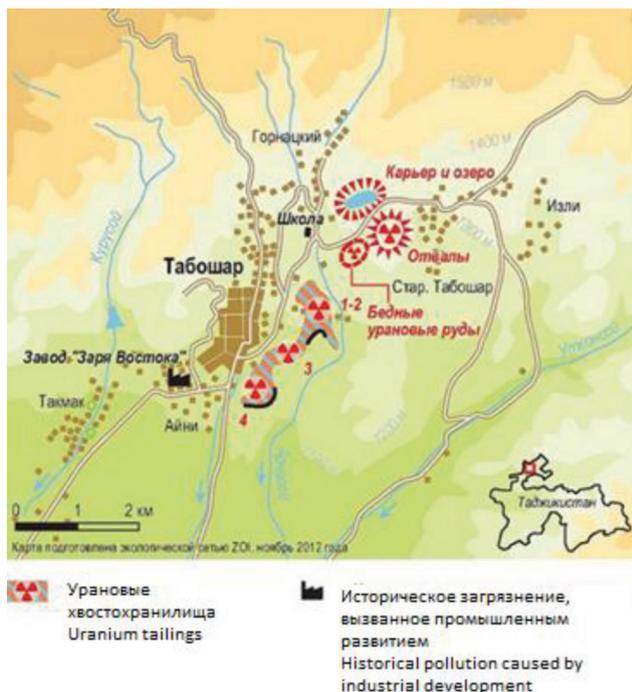


Рис. 2. Урановые хвостохранилища  
[Fig. 2. Uranium tailings]

Все эти хвостохранилища размещены в южных отрогах гор Карамазар, представляющих оконечность Кураминского хребта (юго-западный Тянь-Шань). Общая площадь 4 хвостохранилищ и отвалов ФБР составляет 63 га.

Мощность амбиентной дозы гамма-излучения (МАД ГИ) в районе хвостохранилищ составляет 0,5–0,6 мкЗв/ч, а в отдельных точках достигает 3,0–4,0 мкЗв/ч. Среднегодовая эмиссия радона с поверхности оценивается в  $3,9 \times 10^{11}$  Бк/год [9].

Все хвосты, за исключением отвалов ФБР, относятся к категории законсервированных. К загрязненным территориям также относятся ручей Сарым-Сахлы Сай, шахтные, промышленные и карьерные воды.

Так называемое Кислотное озеро – это карьер (рис. 3), образовавшийся во время добычи руды откры-



Рис. 3. Карьер, или Кислотное озеро  
[Fig. 3. Quarry or "Acid Lake"]

тым способом. Диаметр карьера 1000 м, глубина 120 м. Он наполовину заполнен водой, образуя Кислотное озеро с содержанием урана 3–5 мг/л [10]. Вокруг карьера сосредоточены отвалы пустой и забалансовой руды. Карьер до 2011 г. не имел физического ограждения, поэтому население имело к нему свободный доступ.

Хвостохранилище I–II очереди (1945–1959 гг.) расположено в 2 км от Истиклола. Хвосты общей массой 2,8 млн тонн расположены на площади 25 га. Поверхность покрыта слоем нейтрального грунта. МАД ГИ на его поверхности составляет до 1,0 мкЗв/ч, а на расстоянии 1,0–1,5 км от его центра за счет вытекания дренажных вод – 1,0–1,5 мкЗв/ч. Среднее содержание урана в хвостохранилище составляет 0,009–0,025%, в растениях на хвостохранилище и вблизи его – 0,004–0,005%, в почве на расстоянии 1,0–1,5 км – 0,004–0,005%. Вода вытекает из-под хвостохранилища с содержанием урана 40–60 мг/л. Не имеет физического барьера.

Хвостохранилище III очереди (1947–1963 гг.) общей площадью 11,1 га расположено в 0,5 км от Истиклола и содержит 2 млн тонн хвостов. Поверхность покрыта слоем нейтрального грунта. МАД ГИ на его поверхности составляет до 0,4–0,8 мкЗв/ч, а на расстоянии 1,0–1,5 км от его центра – 0,2–0,4 мкЗв/ч. Среднее содержание урана в хвостохранилище составляет 0,01–0,015%, в растениях на хвостохранилище и вблизи него – 0,004–0,005%. Не имеет физического барьера.

Хвостохранилище IV очереди (1969–1975 гг.) площадью 18,7 га расположено в 1 км от Истиклола и содержит 7 млн тонн хвостов. Поверхность покрыта слоем нейтрального грунта. МАД ГИ на его поверхности составляет до 0,4–0,7 мкЗв/ч, а на расстоянии 1,0–1,5 км от его центра – 0,2–0,4 мкЗв/ч. Среднее содержание урана в хвостохранилище составляет 0,01–0,015%, в растениях на хвостохранилище и вблизи него – 0,004–0,005%. В непосредственной близости от хвостохранилища находился цех кучного выщелачивания, от которого в настоящее время остались ветхие железобетонные конструкции.

Хвостохранилище гидрометаллургического завода (ГМЗ), содержащее 1,17 млн тонн отходов, расположено в 3 км выше по течению ручья от центра г. Истиклола. Поверхность покрыта слоем нейтрального грунта. МАД ГИ на его поверхности составляет до 0,4–0,7 мкЗв/ч, а на расстоянии 1,0–1,5 км от его центра – 0,2–0,4 мкЗв/ч. Среднее содержание урана в хвостохранилище составляет 0,01–0,015%, в растениях на хвостохранилище и вблизи него – 0,004–0,005%. В его окрестностях также сосредоточены отвалы пустой породы и забалансовых руд, образовавшихся в процессе эксплуатации карьера. МАД ГИ в окружении отвалов составляет 0,4–0,6 мкЗв/ч, а в отдельных точках достигает 3,0–4,0 мкЗв/ч [10–14].

Хотя мощность покрытий хвостохранилищ нейтральным грунтом в соответствии с паспортами объектов составляла 0,7–1,0 м, со временем реальная толщина покрытия, отмеченная экспертами МАГАТЭ в 2006 г., составляет не более 0,5 м, а на некоторых участках – всего 0,2–0,3 м. Такое покрытие фактически не является препятствием для доступа кислорода и проникновения атмосферных осадков в тело хвостохранилища, оно также повсеместно разрушается роющими животными, которые выносят материал хвостов на поверхность, что приводит к увеличению площади участков интенсивного

радоновыделения из тела хвостохранилищ. На участках с разрушенным покрытием наблюдаются высокие потоки радона, достигающие 3–9 Бк/м<sup>2</sup>·с [11].

Отвалы Фабрики бедных руд расположены в 4 км от центра г. Истиклола. Они предназначались для возможной вторичной переработки. Хранилище ФБР – конусообразный незаконсервированный холм из перемолотого светло-желтого материала после экстракции урана, высотой 67 м, площадью 7,9 га и объемом накопленного материала 1128,5 тыс. м<sup>3</sup>, который на протяжении всего периода существования подвергается ветровой и водной эрозии (рис. 4). МАД ГИ на поверхности отвала составляет 1,0–4,0 мкЗв/ч. Содержание урана в растениях на хвостохранилище и вблизи него составляет 0,004–0,005%. В местах, где накапливался смытый материал с поверхности отвала в результате эрозии, МАД ГИ составляла 2,2–2,7 мкЗв/ч и выше. Содержание урана в почве на расстоянии 1,0–1,5 км составляет 0,005% [10–13, 15].



Рис. 4. Отвалы Фабрики бедных руд  
[Fig. 4. Dumps of the “Poor ores factory”]



Особой проблемой комплекса захоронений в Истиклоле является отвод остаточных кислотных растворов, выклинивающихся в виде родников из-под захоронений. Так, на хвостохранилище I–II очередей обнаружены родники с повышенным содержанием сульфат-иона ( $\text{SO}_4^{2-}$  – 9200–9600 мг/л) и гидрокарбонатов ( $\text{HCO}_3^-$  – 1800 мг/л), а также растворенного урана и других радионуклидов ряда <sup>238</sup>U.

В процессе испарения на берегах ручьев образуются кристаллы с желтой каймой, как на рисунке 5, представляющие собой сульфатные комплексы концентрированного урана с удельной активностью до 12–15 кБк/кг [11, 16].

#### Проблемы хвостохранилищ

В воде, выклинивающейся из-под бывших шахт, наблюдается высокое содержание урана. Анализ данных показывает, что воды района Истиклола характеризуются повышенным содержанием <sup>234</sup>U, <sup>238</sup>U и <sup>226</sup>Ra [11]. Во время дождей образующиеся временные ручьи несут зараженную воду с открытой поверхности отвалов ФБР, которая стекает в Сарым-Сахлы Сай. Следы материала из хвостохранилища были отмечены на расстоянии нескольких километров по долине сая. Поэтому вода в несанкционированных источниках содержит не только тяжелые металлы, но и радионуклиды.

Одной из главных проблем после распада СССР и гражданской войны 1992–1997 гг. была нехватка питьевой воды. Не имея доступа к качественной питьевой воде, население было вынуждено использовать неорганизованные источники воды (дренажи, арыки, каналы, пруды) (рис. 6) с суммарной альфа-активностью порядка 1 Бк/л, т.е. превышающей установленный норматив для питьевой воды в 10 раз [11, 12]. Такая вода использовалась не только для орошения садов и водопоя скота, но и для питья.

Природные катаклизмы усугубляют загрязнение окружающей среды. Проходившие в 1998–2000 гг. сели смыли значительную часть материала одного из хвостохранилищ в долину ручья Сарым-Сахлы Сай, впадающего, в свою очередь, в трансграничную с Узбекистаном реку Сыр-Дарью. Выделенные правительством Таджикистана и Организацией по безопасности и сотрудничеству в Европе (ОБСЕ) средства были направлены на ликвида-



Рис. 5. Кристаллы уранила  
[Fig. 5. Uranyl crystals]



**Рис. 6.** Использование воды населением из несанкционированных источников  
 [Fig. 6. Public use of water from unauthorized sources]

цию последствий схода селя в Истиклоле. При участии сотрудников Комитета по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне (КЧС и ГО), Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана (АХБРЯБ НАНТ) и местного населения была проведена очистка и восстановление селеловушки, а также перекрыта оголенная часть «языка» хвостохранилища. Но сделанного все же недостаточно, так как большая часть хвостового материала цеха № 3 была вынесена на значительные расстояния вниз по течению долин Сарым-Сахлы Сай и Уткем-Су. Материал хвостохранилища еще не собран и не захоронен [17]. Образовавшиеся отложения из материала хвостохранилища, как оказалось, использовались местными жителями в качестве строительного материала и площадок для посева сельскохозяйственных культур. При гамма-съемке жилого массива Табшар в 2001 г. ГП «Востокредмет» (ныне ГУП «Таджредмет») были выявлены участки с уровнем МАД ГИ до 1,44 мкЗв/ч при средних значениях 0,48 мкЗв/ч, что, очевидно, связано с использованием отвального (частично рудного) материала при строительстве, отсыпке и планировке городских улиц [18].

Карьер также не реабилитирован после эксплуатации. Он наполовину заполнен шахтной водой и не имеет физического барьера. Склоны карьера крутые. В случае землетрясения ожидается оползень на склонах и обрушение подземных выработок.

Воды карьера, дренажи хвостохранилища I–II очереди содержат уран, марганец, свинец и железо [9], что исключает возможность их использования для питьевого водоснабжения. Эти воды негативно воздействуют на окружающую среду региона в целом. Мониторинг воды карьера на содержание изотопов  $^{210}\text{Po}$  и  $^{210}\text{Pb}$  и их накопление в организме рыб, обитающих в нем и употребляемых местным населением в пищу, показал, что уровень изотопа  $^{210}\text{Po}$  в печени, в частности, карасей сравнительно высокий [19].

Так как карьер и хвостохранилища не имели физических барьеров, знаков, предупреждающих о радиационной

опасности, через них были проложены несанкционированные дороги (рис. 7), на их поверхности выпасался домашний скот (рис. 8), а к северо-западной части одного из хвостохранилищ примыкает частный жилой массив (рис. 9). Здания заводов разбирались населением для использования в качестве строительного материала, дерево шло на дрова для приготовления пищи и обогрева, металл – на металлолом. Поверхность 4 хвостохранилищ, покрытая тонким защитным слоем, разрушалась под воздействием ветровой и водной эрозии, а также роющих животных, что увеличивало эмиссию радона из тела хвостохранилищ.

Поскольку до 2005 г. население практически не имело информации об опасности использования загрязненных радионуклидами воды, почвы, разрушенного здания гидрометаллургического комбината для строительства домов, а также выпаса скота на территориях хвостохранилищ, оно подвергалось ненужному дополнительному облучению.



**Рис. 7.** Несанкционированные дороги на территории хвостохранилищ  
 [Fig. 7. Unauthorized roads on the tailings territory]



**Рис. 8.** Выпас скота на загрязненных территориях  
 [Fig. 8. Livestock grazing in contaminated areas]



Рис. 9. Расположение жилого сектора вблизи опасных участков [Fig. 9. Location of the residential sector near hazardous areas]

### Меры, принимаемые для улучшения радиологической обстановки в Истиклоле

Первой международной организацией, затронувшей вопросы решения проблем отходов добычи и переработки урана в Узбекистане, Кыргызстане, Таджикистане, России и Украине, стала Европейская комиссия (ЕК) в рамках проекта программы ТАСИС (программа технической поддержки стран СНГ «Technical Assistance to the Commonwealth of Independent States») «Атомная безопасность» в 1995 г.

Внимание к радиологической обстановке в Истиклоле и другим объектам, находящимся в Согдийской области Таджикистана, стало привлекаться после создания в 2003 г. Агентства по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана (с 05.10.2021 г. – Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАНТ). Вопросы о необходимости проведения реабилитационных работ были подняты на международный уровень. Правительство Республики Таджикистан и руководство соседних стран призвали международные организации оказать помощь в решении проблем, связанных с реабилитацией урановых хвостохранилищ.

Для проведения реабилитационных работ на бывших объектах переработки урановых руд в Северном Таджикистане необходимо было предварительно подготовить нормативно-правовую базу, гармонизированную с требованиями МАГАТЭ, а также провести исследования этих объектов. На сегодняшний момент нормативно-правовая база разработана. Исследовательские работы были выполнены АХБРЯБ НАНТ в 2005–2008 гг. в рамках Регионального проекта технического сотрудничества МАГАТЭ RER/9/086 «Безопасное управление отходами добычи и переработки урановых руд в странах Центральной Азии» (2005–2008 гг.), программы Назвития Организации Объединенных Наций (ПРООН) при поддержке ЕК, ОБСЕ, Всемирного банка (ВБ), Европейского банка реконструкции и развития (ЕБРР) и Североатлантического альянса (НАТО), а также в рамках национальных проектов, финансируемых из бюджета Республики Таджикистан: TAD/9/002 «Применение международных стандартов по безопасности в управлении отходами» (2005–2006 гг.), «Установление радиационного мониторинга в урановых

хвостохранилищах в Северном Таджикистане» (2007–2008 гг.) и «Радиологический мониторинг хвостохранилищ радиоактивных отходов (работы были проведены ГУП «Тадредметаллы» в 2009–2014 гг.). По результатам оценки рисков Истиклолу (Табшару) была присвоена самая высокая приоритетность [20].

Для оценки радиационной опасности хвостохранилищ для населения сотрудниками АХБРЯБ НАВНТ и его филиала в Согдийской области ведутся работы по мониторингу содержания радона в воздухе на территориях хвостохранилищ и в жилом массиве г. Истиклола, а также содержания радионуклидов в почве и воде [15, 21]. Хотя, по данным исследования, содержание радона в воздухе над поверхностью хвостохранилищ является невысоким, эксгаляция радона с поверхности почвы всех обследованных хвостохранилищ значительно превышает норматив<sup>1</sup>, составляя около 1 Бк/(м<sup>2</sup>·с). Результаты измерений объемной активности (ОА) радона в воздухе жилых зданий и других объектов г. Истиклола показали, что значение средней ОА радона находится в пределах 44–195 Бк/м<sup>3</sup>, что не превышает установленного норматива. Высокое значение ОА радона отмечается на бывшем полуразрушенном заводе (1319 Бк/м<sup>3</sup>).

Для минимизации радиационного воздействия на население и окружающую среду путем проведения реабилитационных работ на загрязненных территориях и хвостохранилищах и создания физической защиты радиационно опасных объектов с учетом передового международного опыта, была разработана «Национальная Концепция Республики Таджикистан по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2014–2024 гг.» (далее – Национальная концепция), утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 01.08.2014 г. № 505. Также Правительством РТ была утверждена «Программа реализации Национальной концепции Республики Таджикистан по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2016–2024 годы» (далее – Программа) от 27 июля 2016 г. № 329.

В данной Программе реабилитационно-восстановительные работы по захоронению отходов ФБР в Истиклоле (Табшар) отмечены в качестве приоритета №1 [20]. В ней четко определены роли и обязанности исполнителей данной Программы:

- координатор – Межведомственный совет по обеспечению радиационной безопасности при Правительстве Республики Таджикистан;
- регулятор – Агентство по ХБРЯБ НАНТ;
- оператор – Министерство промышленности и новых технологий Республики Таджикистан, Государственное унитарное предприятие «Таджикские редкие металлы»;
- институциональный контроль на объектах уранового наследия осуществляется совместно оператором и регулятором на всех этапах (планирование, проектирование, выполнение работ, постреабилитационный период).

Все реабилитационные работы на хвостохранилищах планируется проводить в основном с участием местного

<sup>1</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-06 СП 2.6.1.001-06): зарег. 16.01.2007 г. Душанбе: Минюст Республики Таджикистан, 2007. 172 с. [Radiation Safety Norms (NRB-06 SR 2.3.1.001-06): regist. 16.01.07. Dushanbe: Ministry of Justice of Republic of Tajikistan, 2007, 172 p. (In Russ.).]

населения, которое пройдет предварительное обучение в области радиационной безопасности. Конечной целью принятой Программы является улучшение здоровья населения и состояния окружающей среды в районах размещения хвостохранилищ, а также создание условий устойчивого развития этих районов.

Для привлечения отечественных и иностранных инвестиций в реабилитационные работы согласно Национальной концепции создаются льготные условия в виде снижения налогов на инвестиции, разрешения на беспрошленный ввоз специальных машин и оборудования.

Несмотря на ожидаемую значительную помощь международных организаций в решении проблем уранового наследия в Республике Таджикистан, именно государство является ответственным за выявление и оценку состояния, техническое обслуживание инженерных сооружений, контроль безопасности и управление объектами уранового наследия. Комиссия государств-участников Содружества Независимых Государств (СНГ) по мирному использованию атомной энергии приняла Межгосударственную целевую программу «Рекультивация территорий государств, затронутых добычей урана» на 2013–2023 гг. Основную часть финансирования программы взяла на себя Россия – 75%, остальные 25% поделили между собой Казахстан (15%), Таджикистан (5%) и Кыргызстан (5%). Программа включает рекультивацию отвалов ФБР и нескольких хвостохранилищ в Истиклоле (Табашар). На Табашарской промплощадке проведены комплексные инженерные изыскания, уточнены геологические и гидрологические условия площадки, проведена топографическая съемка. В рамках экологических изысканий проводились эманационные и гамма-съемки, отбор почвы и растительности; уже проведены изыскательские, проектно-изыскательские и экспертные работы [10]. Объявленный Госкорпорацией «Росатом» тендер на выполнение рекультивационных работ в Истиклоле выиграл Центральный проектно-технологический институт (АО «ЦПТИ», предприятие Топливной компании «ТВЭЛ» госкорпорации «Росатом»). Согласно контракту, до конца 2023 г. будет проведена рекультивация отвала ФБР промплощадки «Табашар» и хвостохранилищ I–IV очередей, а также организована система водоотведения [22].

#### **Участие местных органов власти, общественности, СМИ, НПО и международных организаций, работа по информированию населения и общественности**

Поднятые вопросы о влиянии хвостохранилищ на загрязнение воздуха, почвы и особенно воды для населения Истиклола привлекли внимание общественности, средств массовой информации, неправительственных и международных организаций.

Одной из критических проблем для населения Истиклола была нехватка питьевой воды. Решение проблемы водоснабжения города – это самое главное условие повышения качества жизни населения.

При поддержке исполнительного органа государственной власти Согдийской области восстановлен недействовавший водозабор, что позволило подать воду во все жилые массивы города. Кроме того, для решения этой проблемы и обеспечения водой махалли (части города

размером с квартал) «Старый Табашар» в 2015 г. проложен самотечный водовод (3,2 км); для обеспечения водой жителей махалли Мехнатобод (Такмак) методом хашара (совместный благотворительный труд) смонтирован и проложен еще один самотечный водовод (5,5 км). Благодаря проекту ЕБРР «Улучшение водоснабжения городов и районов Северного Таджикистана» была восстановлена система водоснабжения старой (верхней) части города, произведена реконструкция и капитальный ремонт насосной станции, что обеспечило питьевой водой около половины всего населения города. На сегодняшний день проблема водоснабжения Истиклола решена на 90% [23].

В Программе реализации «Национальной концепции Республики Таджикистан по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2016–2024 годы» особое внимание уделяется связям с общественностью и ее информированию. Для избежания неадекватного восприятия рисков и радиофобии у местного населения и снижения социального напряжения данные мониторинга окружающей среды Истиклола, проводимые Агентством по ХБРЯБ НАНТ и сотрудниками ГУП «Таджредмет», а также результаты научно-исследовательских работ регулярно публикуются в открытой печати, журналах и сборниках конференций. В Агентстве по ХБРЯБ НАНТ и в его филиале в Согдийской области существуют отделы международных отношений и связей с общественностью, где население может получить консультацию и ответы на интересующие вопросы (сайт Агентства по ХБРЯБ НАНТ: <https://cbnrn.tj>).

В рамках реализации Программы с участием местной администрации, КЧС и ГО, «Молодежной группы по охране окружающей среды Согдийской области», Информационно-экологического «Орхус Центра» Согдийской области, ОО «Молодежного экологического центра» при поддержке ОБСЕ, ЮНЕП, ПРООН в Таджикистане и других организаций проводятся информационно-образовательные тренинги, круглые столы, лекции по вопросам радиационной безопасности, санитарии и личной гигиены и даются рекомендации по питанию и водопользованию в зонах повышенного радиационного риска [24, 25].

В связи с предстоящими реабилитационными работами на загрязненных участках г. Истиклола сотрудниками Агентства по ХБРЯБ НАНТ и его филиала в Согдийской области при поддержке ОБСЕ в рамках проекта «Вовлечение заинтересованных сторон для восстановления объектов уранового наследия в Центральной Азии» проводятся учебные курсы для местных исполнительных органов государственной власти (рис. 10), медработников [26]. Подготовленные Агентством по ХБРЯБ НАНТ буклеты и брошюры по основам радиационной безопасности распространяются среди населения и школьников.

Санитарно-эпидемиологической службой Республики Таджикистан совместно со специалистами Федерального медико-биологического агентства России и Госкорпорации «Росатом» подготовлена Программа социально-гигиенического мониторинга воздействия объектов на здоровье населения. 2 ноября 2017 г. в Истиклоле состоялись общественные слушания по данной Программе. По результатам обсуждения получено общественное одобрение и подписан протокол [10].

Поскольку все хвостохранилища расположены в Согдийской области Таджикистана, здесь регулярно



Рис. 10. Учебный курс для пресс-секретарей исполнительных органов государственной власти Согдийской области по информированию населения по вопросам рекультивации радиоактивных отходов

[Fig. 10. Training course on informing the population on the issues of radioactive waste reclamation for press secretaries of the executive bodies of state power of the Sughd region]

проводятся встречи и круглые столы по обмену опытом в области водоотведения в аспекте радиационной безопасности с заинтересованными сторонами при поддержке Санитарно-эпидемиологической службы Согдийской области, НПО, регионального отделения Общества Красного Креста и Полумесяца Таджикистана и других международных организаций.

Работа по информированию и привитию культуры радиационной безопасности приносит свои плоды: население все с большим доверием относится к данным оценки состояния и проводимых мероприятий на площадках, оно заинтересовано и принимает активное участие в восстановительных и рекультивационных работах.

Так, население (волонтеры) принимало активное участие в строительстве частичного ограждения вокруг так называемого Кислотного озера (рис. 11), а также расчищало русло ручья Сарым-Сахлы Сай, помогало устанавливать знаки, предупреждающие о наличии поблизости опасных радиоактивных объектов (2011 г.) [25]. Работы проводились при поддержке ОБСЕ и областного штаба КЧС и ГО.



Рис. 11. Местное население помогает устанавливать ограждения вокруг Кислотного озера

[Fig. 11. The local population helps to put up fences around the "Acid Lake"]

Реализация Программы позволит повысить уровень радиоэкологической грамотности населения, обучить его правилам безопасного землепользования в районах расположения объектов уранового наследия, а также сформировать доверие к данным оценки их состояния и деятельности.

Связь с населением, информирование и регулярные меры технического надзора позволят снизить количество случаев использования материалов из хвостохранилищ, отвалов бедных руд, полуразрушенных зданий заводов по переработке урановой руды и металлолома для строительства и бытовых нужд.

Пока места захоронения не реабилитированы, риски для здоровья существуют. На сегодняшний день населению следует избегать посещения этих мест. Публикации данных экологического мониторинга в открытой печати помогают населению правильно оценить ситуацию.

### Заключение

Истиклол является одним из примеров городов бывших союзных республик Средней Азии, где сохраняются экологические проблемы, связанные с добычей урана. Те же радиоэкологические проблемы достались в наследство соседним республикам: Узбекистану, Кыргызстану и Казахстану. Возможно, если бы не развал Советского Союза, эти проблемы были бы уже решены.

Гражданская война и глубокий экономической кризис, неосведомленность населения о вреде использования загрязненных радионуклидами воды, почвы, строительного материала привели к ненужному его переоблучению. Поэтому очень важно, чтобы общественность и население были грамотными в отношении возможных радиационных угроз. Для этого культуру радиационной безопасности нужно прививать, начиная с младших классов, особенно в тех школах, которые расположены вблизи мест добычи, переработки урановой руды и отходов ее производства.

Воплощение Программы реализации «Национальной концепции Республики Таджикистан по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2016–2024 годы» Правительством Республики Таджикистан совместно с международными организациями, местными органами власти,

населением, постоянный радиоэкологический мониторинг воды, воздуха, почвы и биоты снимут риск попадания радиоактивных веществ и тяжелых металлов в трансграничную речную систему и возникновения экологической катастрофы, улучшат радиационно-экологическую обстановку, что приведет к росту социально-экономического уровня жизни населения г. Истиклола. Все это поможет снять социальную напряженность и повысить доверие населения к ядерной энергетике.

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

Хакимова Н.У. – определение цели и задач исследования, оформление и написание статьи.

Зойтова М.А. – поиск и анализ литературных данных.

#### **Информация о конфликте интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Благодарности**

Выражаем благодарность директору Филиала АХБРЯБ НАНТ в Согдийской области д.т.н., профессору Назарову Х.М. за предоставленные данные по радиоэкологическому мониторингу хвостохранилищ, а также нашим анонимным рецензентам за полезные советы и замечания по статье.

#### **Сведения об источнике финансирования**

Публикация не имела финансовой поддержки.

#### **Литература**

- Щербиков Д.И. В поисках радия. М.; Л.: Госгеолгиздат, 1941. 136 с.
- Нестеров Ю.В., Петрухин Н.П. Создание и развитие минерально-сырьевой базы отечественной атомной индустрии. М.: ООО «Атлант-С», 2017. 399 с.
- Ершова З.В. Мои встречи с академиком В.Г. Хлопиным (1924-1950 гг.) Академик В.Г. Хлопин: очерки, воспоминания современников. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1987. С. 85–121.
- Петрухин Н.П. История уранодобычи. К 75-летию атомной отрасли. М.: АО «Атомредметзолото», 2020. 437 с.
- Круглов А.К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. 380 с.
- Фильцев Ю., Ларин В., Разыков З., и др. Пионеры секретного атома: 50 лет первенцу атомной промышленности СССР по добыче и переработке урана в Таджикистане 1945-1995 гг. Чкаловск, 1995. 68 с.
- Чирков Б.Н. Воспоминания первого директора комбината № 6 (ГП «Востокредмет»). М., 1967. 52 с.
- Саломов Дж.А. О сотрудничестве Республики Таджикистан с МАГАТЭ в области радиационной безопасности населения и окружающей среды // Бюллетень по атомной энергии ФГУП «ЦНИИАтоминформ». 2007. № 8. С. 49–52.
- Хакимов Н., Назаров Х.М., Мирсаидов И.У. Физико-химические и технологические основы получения урановых концентратов из отходов гидрометаллургических заводов и технических вод. Душанбе: Дониш, 2012. С. 35–43.
- Мирсаидзода И., Назаров Х.М., Саломов Дж.А. Радиоактивные хвостохранилища Таджикистана: проблемы и решения. Душанбе: ООО «Аршам», 2022. 206 с.
- Безопасное управление отходами добычи и переработки урановых руд в странах Центральной Азии. Результаты Регионального проекта технического сотрудничества RER/9/086 (2005-2008 гг.). Предварительный отчет. Вена: МАГАТЭ, 2008. 164 с.
- Мирсаидов У., Хакимов Н., Назаров Х.М. Ядерное наследие Советского Союза в Таджикистане: Проблемы и решения. Сборник научных трудов сотрудников Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН РТ Радиоэкологический мониторинг биосреды и радиационная безопасность Таджикистана. Душанбе: ООО «Мавлави», 2010. С. 133–137.
- Хакимов Н., Войцехович О.В., Саидов В.Я., и др. Радиоэкологический мониторинг хвостохранилищ Северного Таджикистана. Материалы VI Нумановских чтений. Душанбе, 2009. С. 207–213.
- Мирсаидзода И., Ахмедов М.З., Баротов Б.Б., и др. Радиоэкологическая ситуация в республике Таджикистан. Душанбе: Дониш, 2021. 114 с.
- Назаров Х.М., Эрматов К.А., Саломов Дж.А., и др. Оценка потенциальной радиационной опасности бывших урановых объектов для населения г. Истиклол Республики Таджикистан // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 83–90. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-83-90.
- Мирсаидов И.У. Физико-химические и технологические основы получения урановых концентратов из местных сырьевых ресурсов Таджикистана: дис. ... докт. тех. наук: защищена 24.06.2016. Душанбе, 2016. 94 с.
- Национальная Концепция Республики Таджикистан по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2014-2024 годы: утв. и введена в действие постановлением Правительства Республики Таджикистан № 505 от 1 августа 2014 г. Нормативные правовые акты (в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности). Душанбе: ООО «Мехрона 2017», 2018. С. 47–70.
- Хакимов Н. Оценка состояния бывших урановых объектов в текущей деятельности по их реабилитации. Материалы международного семинара «Урановое наследие Советского союза Центральной Азии: проблемы и решения», Душанбе, 20-22 ноября 2012. Душанбе: Дониш, 2012. С. 51–57.
- Миряхьяев В.М., Тиллобоев Х.И., Назаров Х.М., и др. Содержание изотопов  $^{210}\text{Po}$  и  $^{210}\text{Pb}$  в воде искусственного озера г. Истиклола Республики Таджикистан и их бионакопление в организме рыб // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2(св). С. 50–53. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2s-50-53.
- Программа реализации Национальной концепции Республики Таджикистан по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2016-2024 годы: утв. и введена в действие постановлением Правительства Республики Таджикистан № 329 от 27 июля 2016 г. Нормативные правовые акты (в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности). Душанбе: ООО «Мехрона 2017», 2018. С. 71–123.
- Мирсаидов У.М., Назаров Х.М., Шошафарова Ш.Г., Махмудова М.М. Радоновый мониторинг на территории Северного Таджикистана // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 68–73. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73.
- Атомная энергия 2.0. ЦПТИ выполнит до конца 2023 года реабилитацию урановых хвостохранилищ площадки «Табошар» в Таджикистане. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/05/18/124783> (дата обращения 25.06.2022).
- Изатуллоев С. Истиклол (Табошар): мифы и правда. URL: [http://narodnaya.tj/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1166:2016-05-20-10-14-32&Itemid=216](http://narodnaya.tj/index.php?option=com_content&view=article&id=1166:2016-05-20-10-14-32&Itemid=216) (дата обращения 25.06.2022).

24. Информационное агентство «АВЕСТА». Жителей города Истиклола обучили вопросам радиационной безопасности. URL: <https://avesta.tj/2016/07/08/zhitelej-goroda-istiklola-obuchili-voprosam-radiatsionnoj-bezopasnosti/> (дата обращения 25.06.2022)
25. Валиев Б. На севере Таджикистана начали ограждать места захоронения радиоактивных отходов. URL: <https://www.asiaplustj.info/news/tajikistan/society/20111128/na-severe-tadzhikistana-nachali-ograzhdad-mesta-zakhoroneniya-radioaktivnykh-otkhodov> (дата обращения 25.06.2022).
26. Семинар по организации работы с населением и заинтересованными сторонами в решении проблем хвостохранилищ Согдийской области. Официальный сайт Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана (АХБРЯБ НАНТ). URL: [https://www.cbrn.tj/lang\\_ru/view\\_news.php?id=503](https://www.cbrn.tj/lang_ru/view_news.php?id=503) (дата обращения 25.06.2022).

Поступила: 19.07.2022 г.

**Хакимова Нодира Умаровна** – кандидат химических наук, заведующая Сектором контроля профессионального облучения Отдела научно-исследовательских и технических услуг Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Агентства по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана.

**Адрес для переписки:** 734025, Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 33; E-mail: nodirataj@mail.ru

**Зоитова Манижа Алишеровна** – ведущий инженер Сектора контроля профессионального облучения Отдела научно-исследовательских и технических услуг Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Агентства по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

**Для цитирования:** Хакимова Н. У., Зоитова М. А. Урановые хвостохранилища г. Истиклола: история, проблемы, решения // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 102–113. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-102-113

## Uranium tailings in the Istiqlol city: history, problems, solutions

Nodira U. Khakimova, Manizha A. Zoitova

Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

*The article provides an overview of the problems associated with the uranium tailings in Istiqlol city. Many uranium heritage sites in Central Asia, including the uranium tailings in Istiqlol, hadn't been mothballed before the collapse of the USSR. The burial complex consists of a quarry, dumps of the "Poor Ores Factory", an unpreserved open mine, destroyed industrial buildings and four tailings which contain 12 million tons of the uranium production waste. In the area of the tailings, the ambient dose rate of gamma radiation is 0.5–0.6  $\mu\text{Sv/h}$ , and at some points it reaches 3.0–4.0  $\mu\text{Sv/h}$ . The average annual radon emission from the surface is estimated at  $3.9 \times 10^{11}$  Bq/year. The contaminated areas also include the Sarym-Sakhly Sai stream, mine, industrial and quarry waters, which are characterized by an increased content of  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{226}\text{Ra}$ . The facilities aren't physically fenced, allowing free access for the public and livestock. Natural disasters such as mudflows, landslides, and earthquakes can lead to an ecological disaster. Attention is paid to the ways of solving problems such as monitoring radionuclides in water, soil, and air; working with the local population to inform and involve them in rehabilitation work; donors search. The Program for the Implementation of the National Concept for the Rehabilitation of Tailings of Uranium Ore Processing Wastes for 2016–2024 was developed and approved by the Government of the Republic of Tajikistan to minimize the radiation impact on the population and the environment. Implementation of the Program requires significant financial investments and trained personals in the field of radiation safety. Only through the joint efforts of the state, population and international organizations is it possible to fully carry out rehabilitation works. Only by joint the state, public, and international organizations efforts, it is possible to solve these problems. Also, one of the main reasons why the population had received unnecessary overexposure was its ignorance of the danger of using water, soil and building materials contaminated with radionuclides. Therefore, the culture of radiation safety should be studied starting from middle school, where students will be taught about ionizing radiation and possible ways*

**Nodira U. Khakimova**

Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Safety and Security Agency

**Address for correspondence:** prosp. Rudaki, 33, Dushanbe, 734025, Tajikistan; E-mail: nodirataj@mail.ru

of exposure. Then, both cases of intake of radionuclides into the body, which could have been avoided, and radiophobia among the population living near the extraction and processing of uranium ore, will be much lower. Some social and economic aspects are also touched upon.

**Key words:** uranium tailings, radioecological problems, landfill remediation, Istiqlol, public awareness, radiation safety.

### Authors' personal contribution

Khakimova N.U. – definition of the purpose and objectives of the study, design and writing of the article.

Zoitova M.A. – searching and analysis of literature data.

### Acknowledgements

We express our gratitude to the Director of the Branch of the CBRN SSA NAST in the Sughd region of Tajikistan, Doctor of Technical Sciences, Professor Nazarov Kh.M. for providing radioecological monitoring data of tailings, as well as to our anonymous reviewers for useful advice and comments on the article.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

### Funding sources

The study wasn't financially supported.

### References

- Shcherbakov DI. In search of radium. M.; L.: Gosgeolizdat; 1941. 136 p. (In Russian).
- Nesterov YuV, Petrukhin NP. Creation and development of mineral raw material base of the domestic nuclear industry. Moscow: Atlant-S LLC; 2017. 399 p. (In Russian).
- Ershova ZV. My meetings with academician V.G. Khlopin (1924-1950). Academician V.G. Khlopin: essays, memoirs of contemporaries. Leningrad: Nauka, Leningrad branch; 1987. P. 85–121. (In Russian).
- Petrukhin NP. History of uranium mining. To the 75th anniversary of the nuclear industry. Moscow: JSC Atomredmetzoloto; 2020. P. 437. (In Russian).
- Kruglov AK. How the nuclear industry was created in the USSR. Moscow: TsNIIatominform; 1995. 380 p. (In Russian).
- Filtsev Yu, Larin V, Razykov Z, et al. Pioneers of the secret atom: 50 years of the first-born of the nuclear industry of the USSR for the extraction and processing of uranium in Tajikistan 1945-1995. Chkalovsk; 1995. 68 p. (In Russian).
- Chirkov BN. Memoirs of the first director of plant No. 6 (GP Vostokredmet). Moscow; 1967. 52 p. (In Russian).
- Salomov JA. On cooperation of the Republic of Tajikistan with the IAEA in the field of radiation safety the population and environment. *Byulleten po atomnoy energii FGUP «TsNIIatominform» = Bulletin on Atomic Energy of the Federal State Unitary Enterprise «TsNIIatominform»*. 2007;8: 49–52. (In Russian).
- Khakimov N, Nazarov KhM, Mirsaidov IU. Physical-chemical and technological bases for obtaining uranium concentrates from wastes of hydrometallurgical plants and industrial waters. Dushanbe: Donish; 2012. P. 35–43. (In Russian).
- Mirsaidzoda I, Nazarov KhM, Salomov JA. Radioactive tailings of Tajikistan: problems and solutions. Dushanbe: Arsham LLC; 2022. 206 p. (In Russian).
- Safe management of waste from mining and processing of uranium ores in the countries of Central Asia. Results of the Regional Technical Cooperation Project RER/9/086 (2005-2008). Preliminary Report. Vienna: IAEA; 2008. 164 p. (In Russian).
- Mirsaidov U, Khakimov N, Nazarov KhM. Nuclear Legacy of the Soviet Union in Tajikistan: Problems and Solutions. Collection of scientific works of employees of the Nuclear and Radiation Safety Agency of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan “Radioecological monitoring of the bioenvironment and radiation safety of Tajikistan”. Dushanbe: Mavlavi LLC; 2010. P. 133–137. (In Russian).
- Khakimov N, Voytsekhovich OV, Saidov VYa, Khamidov FA, Ahmedov MZ. Radioecological monitoring of tailings in Northern Tajikistan. Materials of the VI Numanov Readings. Dushanbe, 2009. P. 207–213. (In Russian).
- Mirsaidzoda I, Ahmedov MZ, Barotov BB, Nazarov KhM, Khamidov FA. Radioecological situation in the Republic of Tajikistan. Dushanbe: Donish; 2021. P. 114. (In Russian).
- Nazarov KhM, Ermatov KA, Salomov JA, Bahronov SM, Mirsaidov UM. Assessment of potential radiation hazard of the former uranium facilities for the population of the Istiqlol city of the republic of Tajikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;11(2): 83–90. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-83-90. (In Russian).
- Mirsaidov IU. Physico-chemical and technological bases for obtaining uranium concentrates from local raw materials in Tajikistan [dissertation]. Dushanbe (Tajikistan): Nuclear and Radiation Safety Agency of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan; 2016. 94 p. (In Russian).
- The National Concept of the Republic of Tajikistan for the rehabilitation of tailings of uranium ore processing waste for 2014-2024: approved and put into effect by the Decree of the Government of the Republic of Tajikistan No. 505 of August 1, 2014. Regulatory legal acts (in the field of ensuring nuclear and radiation safety). Dushanbe: Mekhrona 2017 LLC; 2018. P. 47–70. (In Russian).
- Khakimov N. Assessment of the state of former uranium facilities in the current activities for their rehabilitation. In: Materials of the international seminar “Uranium legacy of the Soviet Union in Central Asia: problems and solutions”, 20-22 November 2012, Dushanbe, Tajikistan. Dushanbe: Donish; 2012. P. 51–57. (In Russian).
- Miryakhyayev VM, Tilloboev Khl, Nazarov KhM, Makhmudova MM, Mirsaidov UM. <sup>210</sup>Po and <sup>210</sup>Pb isotopes content in the water of Artificial Lake of Istiqlol City of the Republic of Tajikistan and their bioaccumulation in the fish. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2(special issue)): 50–53. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2s-50-53. (In Russian).
- The Program for the implementation of the National Concept of the Republic of Tajikistan on the rehabilitation of tailings of waste processing uranium ore for 2016-2024: approved and put into effect by the Decree of the Government of the Republic of Tajikistan No. 329 dated July 27, 2016. Regulatory legal acts (in the field of ensuring nuclear and radiation safety), Dushanbe: Mekhrona 2017 LLC; 2018. P. 71–123. (In Russian).
- Mirsaidov UM, Nazarov KhM, Shosafarova ShG, Mahmudova MM. Radon monitoring on the territory of Northern Tajikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 68–73. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73. (In Russian).
- Atomic Energy 2.0. JSC “CDTI” will rehabilitate the uranium tailings at the Taboshar site in Tajikistan by the end of 2023. Available from: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/05/18/124783> [Accessed 25 June 2022]. (In Russian).
- Izatulloev S. Istiqlol (Taboshar): myths and truth. Available

from: [http://narodnaya.tj/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1166:2016-05-20-10-14-32&Itemid=21606/21/2022](http://narodnaya.tj/index.php?option=com_content&view=article&id=1166:2016-05-20-10-14-32&Itemid=21606/21/2022) [Accessed 25 June 2022]. (In Russian).

24. Avesta.Tj. Residents of the city of Istiqlol were trained in radiation safety issues. Available from: <https://avesta.tj/2016/07/08/zhitelej-goroda-istiklola-obuchili-voprosam-radiatsionnoj-bezopasnosti/> [Accessed 25 June 2022]. (In Russian).
25. Valiev B. In the north of Tajikistan, radioactive waste burial sites began to be fenced off. Available from: [\[vere-tadzhikistana-nachali-ograzhdad-mesta-zakhoroneniya-radioaktivnykh-otkhodov\]\(http://www.asiaplustj.info/news/tajikistan/society/20111128/na-se-vere-tadzhikistana-nachali-ograzhdad-mesta-zakhoroneniya-radioaktivnykh-otkhodov\) \[Accessed 25 June 2022\]. \(In Russian\).](https://www.asiaplustj.info/news/tajikistan/society/20111128/na-se-</a></li></ol></div><div data-bbox=)

26. Seminar on organizing work with the population and stakeholders in the solving problems of tailing dumps in the Sughd region. Official website of the Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan (CBRN NAST). Available from: [https://www.cbrn.tj/lang\\_ru/view\\_news.php?id=503](https://www.cbrn.tj/lang_ru/view_news.php?id=503) [Accessed 25 June 2022]. (In Russian).

Received: July 19, 2022

**For correspondence: Nodira U. Khakimova** – Candidate of Chemical Sciences, Head of the Occupational Exposure Control Sector of the Research and Technical Services Division, Nuclear and Radiation Safety Agency under the National Academy of Sciences of Tajikistan (prosp. Rudaki, 33, Dushanbe, 734025, Tajikistan; E-mail: nodirataj@mail.ru)

**Manizha A. Zoitova** – Lead Engineer, Sector for Occupational Exposure Control, Research and Technical Services Division, Nuclear and Radiation Safety Agency under the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

**For citation: Khakimova N.U., Zoitova M.A. Uranium tailings in the Istiqlol city: history, problems, solutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 102-113. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-102-113**

## Перспективы обеспечения радиационной безопасности при облучении природными источниками ионизирующего излучения на новых территориях Российской Федерации

А.В. Калайдо<sup>1</sup>, Т.А. Кормановская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Луганский государственный педагогический университет, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

*В статье рассмотрены перспективы обеспечения радиационной безопасности при облучении природными источниками ионизирующего излучения на территориях, вошедших в состав Российской Федерации в 2022 г. Выполнено сравнение требований нормативных актов по радиационной безопасности, действовавших в 4 новых субъектах Российской Федерации (Донецкой и Луганской Народных Республиках, Запорожской и Херсонской областях) на момент их вхождения в состав России, с соответствующими российскими документами, отмечено отсутствие гармонизации действующего санитарного законодательства в части обеспечения радиационной безопасности Российской Федерации и Республики Украина с рекомендациями международных организаций. Приведены результаты исследований в части облучения природными источниками ионизирующего излучения населения республик Донбасса и Запорожской области, проанализированы сложности и перспективы обеспечения радиационной безопасности жителей данных территорий, а также Херсонской области. Дана характеристика текущего состояния нормативно-методической базы Российской Федерации по обеспечению радиационной безопасности при облучении природными источниками ионизирующего излучения, изложены перспективы гармонизации отечественного санитарного законодательства по вопросам обеспечения радиационной безопасности с рекомендациями международных организаций.*

**Ключевые слова:** природные источники ионизирующего излучения, радон, эффективная доза, нормы радиационной безопасности, гармонизация.

### Введение

Политические события весны 2014 г. в Республике Украина привели к провозглашению Луганской и Донецкой Народных Республик (ЛНР и ДНР), объявивших в мае того же года о независимости. С этого момента начинается процесс становления собственного законодательства республик Донбасса, в том числе – в вопросах радиационной безопасности. С самого начала был взят курс на сближение собственной нормативно-правовой базы с российской, но до момента разработки соответствующих законодательных актов продолжали действовать украинские документы (в редакции на май 2014 г.),

если таковые не противоречили Конституциям ЛНР и ДНР. Таким образом, до последнего времени сохраняли действующий статус Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97/Д-2000)<sup>1</sup>, а также ряд других документов санитарного и строительного законодательства, регламентирующие условия облучения населения источниками ионизирующего излучения.

За признанием суверенитета ЛНР и ДНР со стороны России последовало вхождение обеих Республик, а также Запорожской и Херсонской областей в состав Российской Федерации в начале октября 2022 г. С этого момента начинается процесс перехода новых субъектов Федерации в российское законодательное поле, кото-

<sup>1</sup> НРБУ-97/Д-2000. Радиационная защита от источников потенциального облучения. Министерство охраны здоровья (МОЗ). Утверждены Постановлением главного санитарного врача Республики Украина № 116 от 12.07.2000 г. [NRBU-97/D-2000. Radiation protection from the sources of potential exposure. Ministry of Healthcare. Approved by the Decree of State Sanitary Doctor of the Ukraine Republic No 116, 12.07.2000 (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

рый планируется окончательно завершить к 1 января 2024 г.<sup>2</sup>.

В этой связи представляет практический интерес сравнение нормативно-правовой базы радиационной безопасности, действовавшей на присоединенных территориях до их вхождения в состав России, с актуальными законодательными актами РФ. Не менее важен и анализ имеющихся результатов радиационных исследований на данных территориях с целью предварительной оценки условий облучения населения республик Донбасса, Запорожской и Херсонской областей.

**Цель исследования** – оценить перспективы обеспечения радиационной безопасности при облучении природными источниками ионизирующего излучения (ПИИИ) населения 4 регионов, вошедших в состав Российской Федерации в 2022 г.

### Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить сравнение требований нормативных актов по радиационной безопасности в части природного облучения, действовавших в новых субъектах Российской Федерации на момент их вхождения в состав России, с соответствующими российскими документами;
- на основании имеющихся данных предварительно оценить радиационную обстановку в части природного облучения населения новых субъектов Российской Федерации.

### Сравнение требований законодательных актов по радиационной безопасности новых субъектов и РФ

В условиях не прекращавшихся весь период суверенного существования республик Донбасса военных действий, а также социально-экономической блокады со

стороны Республики Украина вопросам защиты населения от природных источников ионизирующего излучения, безусловно, не уделялось должного внимания. Как следствие, в ЛНР и ДНР за данный период был принят только Закон «О радиационной безопасности населения»<sup>3</sup>, содержащий наиболее общие принципы защиты населения от действия источников ионизирующего излучения.

В Запорожской и Херсонской областях радиационная безопасность населения обеспечивалась требованиями Закона Украины «О защите человека от влияния ионизирующего излучения»<sup>4</sup>.

Основным документом санитарного законодательства, регламентирующим вопросы радиационной безопасности в регионах до их вступления в состав России, являлись Нормы радиационной безопасности Украины НРБУ-97/Д-2000, утвержденные в первой редакции Министерством охраны здоровья еще в конце 1997 г. Данный документ изначально разрабатывался на основании положительного опыта советских Норм радиационной безопасности НРБ-76/87<sup>5</sup> и отдельных положений российских Норм радиационной безопасности НРБ-96<sup>6</sup> (как и действующие в настоящее время в Российской Федерации Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009<sup>7</sup>), поэтому в целом идеология обеспечения радиационной безопасности населения при природном облучении в украинских и российских санитарных правилах схожа; отличия проявляются в частных подходах к нормированию отдельных факторов радиационной обстановки в части ПИИИ.

Например, при аналогичной классификации строительных материалов и сырья по величине эффективной удельной активности ( $A_{эфф}$ ) природных радионуклидов (ПРН) (формулы для расчета  $A_{эфф}$  ПРН в НРБУ-97/Д-2000 и НРБ-99/2009 отличаются только по количеству десятичных знаков в представлении значений взвешивающих коэффициентов) и идентичных требованиях к строительным материалам и сырью, допускающих их использо-

<sup>2</sup> Федеральный конституционный закон «О принятии в Российскую Федерацию Луганской Народной Республики и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта – Луганской Народной Республики». Одобрен Государственной Думой 3 октября 2022 г. Одобрен Советом Федерации 4 октября 2022 г. [Federal constitutional law “On the initiation of the Lugansk People Republic into the Russian Federation and on establishment of new subject of the Russian Federation – Lugansk People Republic”. Approved by the State Duma on 3 October 2022. Approved by the Federation Council on 4 October 2022 (In Russ.)]

<sup>3</sup> Закон Донецкой Народной Республики № 374-ПНС «О радиационной безопасности населения». Принят Постановлением Народного Совета от 11.04.2022 г. [The Law of the Donetsk People Republic No 374-PNC “On the radiation safety of the public”. Approved by the Decree of People Council on 11.04.2022 (In Russ.)]

<sup>4</sup> Закон Украины от 14 января 1998 г. № 15/98-ВР «О защите человека от воздействия ионизирующего излучения». [The Law of the Ukraine No 15/98-VR “On the protection of human from ionizing exposure” (In Russ.)]

<sup>5</sup> Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87. Утверждены Главным государственным санитарным врачом СССР 26 мая 1987 г. № 4392-87 [Norms of the radiation safety NRB-76/87. Approved by the Chief State sanitary doctor of the USSR on 26.05.1987. No 4392-87 (In Russ.)]

<sup>6</sup> СП 2.6.1.758-99 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)». Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 2 июля 1999 г. [SP 2.6.1.758-99 “Norms of the radiation safety NRB-99” Approved by the Chief State sanitary doctor of the Russian Federation on 2.07.1999 (In Russ.)]

<sup>7</sup> 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.)]

вание без ограничений по радиационному фактору ( $A_{эфф}$  ПРН не более 370 Бк/кг – I класс) и допустимых к использованию в промышленном и дорожном строительстве ( $A_{эфф}$  ПРН от 370 до 740 Бк/кг – II класс), III класс строительных материалов в российском законодательстве ограничен максимальным значением  $A_{эфф}$  ПРН на уровне 1500 Бк/кг (дорожное строительство вне населенных пунктов), в украинском – 1350 Бк/кг (в пределах населенных пунктов: строительство подземных сооружений или коммуникаций, покрытых слоем грунта толщиной не менее 0,5 м, время пребывания людей в которых составляет не более 50% рабочего дня; вне границ населенных пунктов: строительство дорог и плотин, а также других объектов, время пребывания людей в которых составляет не более 50% рабочего дня). К IV классу строительных материалов с наибольшими ограничениями по их применению в Российской Федерации относятся материалы с  $A_{эфф}$  ПРН от 1500 до 4000 Бк/кг, в Республике Украина – от 1350 до 3700 Бк/кг.

Для ограничения внешнего облучения населения за счет нахождения в помещениях в НРБУ-97/Д-2000 для зданий с постоянным пребыванием людей установлены нормативы по величине мощности поглощенной в воздухе дозы гамма-излучения (73 пГр/с (30 мкР/ч) – для вновь построенных и реконструированных зданий; 122 пГр/с (50 мкР/ч) – для эксплуатируемых зданий). В НРБ-99/2009 нормируемым показателем фактора внешнего облучения за счет ПИИИ в зданиях является мощность эффективной дозы (МЭД) гамма-излучения; для жилых и общественных зданий МЭД гамма-излучения в помещениях (МЭД<sub>пом.</sub>) не должна превышать аналогичный показатель для открытой местности (МЭД<sub>от.</sub>) более чем на 0,2 мкЗв/ч, независимо от того, является здание вновь построенным или уже эксплуатируемым.

В НРБУ-97/Д-2000 для количественной оценки содержания радона в воздухе помещений применяется, как и в России, среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) изотопов радона. Однако украинскими нормами предусмотрены более жесткие, чем в российском санитарном законодательстве, контрольные уровни, а именно:

– в воздухе зданий и сооружений, возводимых или реконструируемых для эксплуатации с постоянным пребыванием людей, среднегодовая ЭРОА радона-222 не должна превышать 50 Бк/м<sup>3</sup>, а среднегодовая ЭРОА радона-220 (торона) – 3 Бк/м<sup>3</sup>;

– для эксплуатируемых зданий и сооружений с постоянным пребыванием людей среднегодовая ЭРОА радона-222 не должна превышать 100 Бк/м<sup>3</sup>, а среднегодовая ЭРОА радона-220 (торона) – 6 Бк/м<sup>3</sup>.

Уровень вмешательства при неэффективности радиозащитных мероприятий в Республике Украина составляет 400 Бк/м<sup>3</sup>.

В НРБ-99/2009 гигиенический норматив содержания радона в воздухе жилых и общественных зданий – среднегодовое значение ЭРОА дочерних продуктов радона и торона, определяемое по формуле:  $ЭРОА_{Rn} + 4,6 \times ЭРОА_{Tn}$ , составляет для вновь построенных (реконструированных)

зданий 100 Бк/м<sup>3</sup>, для эксплуатируемых – 200 Бк/м<sup>3</sup> (если в данную формулу подставить значения, указанные в качестве нормативных значений в НРБУ-97/Д-2000, получим, соответственно, 63,8 и 127,6 Бк/м<sup>3</sup>).

В отношении нормирования показателей радиационной безопасности питьевой воды, в отличие от НРБ-99/2009, в НРБУ-97/Д-2000 не прописаны критерии предварительной оценки качества воды по удельной суммарной альфа- и бета-активности радионуклидов, однако для отдельных ПРН приведены уровни действия (по смыслу – аналогичные уровням вмешательства, установленным в НРБ-99/2009). В таблице 1 приведены удельные активности ПРН, соответствующие уровням действия согласно НРБУ-97/Д-2000, в сравнении с уровнями вмешательства по содержанию ПРН в питьевой воде в соответствии с Приложением 2а к НРБ-99/2009 (сравнение проведено в отношении радионуклидов, приведенных в НРБУ-97/Д-2000).

Таблица 1

**Уровни действия (УД) (НРБУ-97/Д-2000) и уровни вмешательства (УВ) (НРБ-99/2009) по содержанию ПРН в питьевой воде**

[Table 1

**Action levels (AL) (NRBU-97/D-2000) and intervention levels (IL) (NRB-99/2009) for the natural occurring radionuclides in drinking water]**

Радионуклид [Radionuclide]	Удельная активность, Бк/кг [Activity concentration, Bq/kg]	
	УД [AL]	УВ [IL]
<sup>226</sup> Ra	1	0,49
<sup>228</sup> Ra	1	0,20
<sup>238</sup> U	–	3,0
Природная смесь изотопов U [Natural mixture of uranium isotopes]	1	
<sup>222</sup> Rn	100	60

Требования к ограничению производственного облучения работников ПИИИ, установленные в российском законодательстве в единицах предела эффективной дозы (5 мЗв/год для любых профессий и производств), в НРБУ-97/Д-2000 приводятся в значениях  $A_{эфф}$  для различных видов минерального сырья и материалов, используемых в неядерных отраслях промышленности.

Наиболее существенным отличием нормативной базы радиационной безопасности республик Донбасса и России является вопрос о критерии потенциальной радоноопасности участка строительства. Украинское законодательство на момент его «замораживания» в мае 2014 г. не предусматривало измерения плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта на участке планируемого строительства; радиационная экспертиза объекта строительства проводилась после возведения здания до введения его в эксплуатацию и состояла в измерении ЭРОА радона в герметизированном помещении, не открывавшемся не менее 24 ч. В российском санитарном законодательстве (ОСПОРБ 99/2010<sup>8</sup>,

<sup>8</sup> 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

СанПин 2.6.1.2800-10<sup>9</sup>) требования к радиационной безопасности земельных участков, предназначенных под строительство зданий и сооружений, включают обязательные измерения ППР с поверхности грунта с последующим принятием решения о необходимости дополнений проектов будущих зданий системой защиты от радона.

Подводя итог вышесказанному, можно отметить, что схожая система нормирования показателей радиационной безопасности при облучении населения ПИИИ, принятая в большинстве бывших республик Советского Союза, в том числе в Российской Федерации и в Республике Украина, должна исключить ряд сложностей при переходе новых субъектов Российской Федерации от действовавших в них до 2022 г. норм к санитарному законодательству России. Примером в данном случае служит положительный опыт внедрения нормативно-методической базы Российской Федерации в части облучения ПИИИ (НРБ-99/2009, ОСПОРБ 99/2010, СанПин 2.6.1.2800-10) в числе других факторов облучения населения при организации санитарной службы в Республике Крым и г. Севастополе, вошедших в состав Российской Федерации в 2014 г.

#### **Текущее состояние проблемы облучения населения новых субъектов РФ природными источниками ионизирующего излучения**

В настоящее время практически все регионы Российской Федерации достаточно хорошо изучены в контексте облучения населения за счет природного и техногенно измененного радиационного фона благодаря функционированию уже более 20 лет Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД) и радиационно-гигиенической паспортизации территорий [1, 2].

Все аккредитованные на определенной территории лаборатории, которые осуществляют радиационный контроль природных и техногенно усиленных источников ионизирующего излучения, должны представлять результаты измерений в региональные банки данных доз облучения, где систематизируется информация о компонентах дозы природного облучения населения по конкретному субъекту Российской Федерации, затем сведения об уровнях природного облучения по всей России аккумулируются в Федеральном банке. Таким образом, накопление экспериментальных данных происходит одновременно от коммерческих организаций, выполняющих радиационно-экологические изыскания как на участках планируемого строительства, так и в зданиях при их приемке в эксплуатацию, и от учреждений, занимающихся вопросами радиационной гигиены и подведомственных Роспотребнадзору.

В новых субъектах Российской Федерации система контроля и учета индивидуальных доз отсутствует, и на ее создание потребуется определенное время. Сложность состоит в том, что по ряду перечисленных ниже причин систематические исследования уровней радиационного облучения населения Донбасского региона не проводились:

1. В Республике Украина традиционно радоноопасными считались только центральные области, расположенные в пределах кристаллического щита.

2. Из-за ограниченности финансирования систематическая оценка доз радиационного облучения населения проводилась в наиболее пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС Киевской, Сумской, Винницкой и Черкасской областях.

3. Из-за крайне низких темпов жилищного строительства на Донбассе до 2014 г. измерения уровней радона при введении зданий в эксплуатацию носили случайный характер, а с началом активной фазы военного конфликта летом 2014 г. строительство окончательно остановилось, уступив место восстановлению разрушенных зданий.

Но даже в такой сложной ситуации различными организациями на территории ЛНР и ДНР, начиная с 2014 г., выполнен ряд исследований, результаты которых позволяют получить хотя бы общее представление о радиационной ситуации в регионе. Территория Донбасса практически не пострадала от аварии на ЧАЭС, и прибавка к естественному гамма-фону со стороны техногенных радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr пренебрежимо мала [3]. Поэтому основным дозобразующим фактором на территории республик Донбасса, как и в подавляющем большинстве субъектов Российской Федерации, выступает облучение радоном и его дочерними продуктами распада (ДПР).

В Донецке исследования уровней радона-222 в жилых и общественных зданиях в основном осуществлялось специалистами медицинского университета и лабораторного центра санитарно-эпидемиологической службы ДНР [4, 5]. Было определено, что ЭРОА радона в воздухе помещений изменялась от 11,4 до 358,6 Бк/м<sup>3</sup>, а в 7% случаев она была выше гигиенического норматива, установленного НРБУ-97/Д-2000. Кроме того, подтвержден логарифмически-нормальный характер распределения помещений по величине ЭРОА с медианным значением 32 Бк/м<sup>3</sup>.

На территории ДНР на побережье Азовского моря также расположена природная радиационная аномалия, известная как «черные», или «монацитовые» пески. Высокая удельная активность радионуклидов ториевого ряда в этом природном материале приводит к формированию внешнего гамма-фона, на 1–2 порядка превышающего величину природного радиационного фона в остальном Донбассе. Но исследования подобных монацитовых ано-

26.04.2010 г. № 40. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115 [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 11, 2010, registration No. 18155. (In Russ.)]

<sup>9</sup> 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. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 27 января 2011 г., регистрационный № 19587 [SanPiN 2.6.1.2800-10 "Hygienic requirements on the limitation of exposure of public by natural sources of ionizing exposure" (In Russ.)]

малый в Индии и Бразилии не подтвердили их опасность для человека [6, 7]. Опасность данные высокоактивные природные материалы начинают представлять, если попадают внутрь зданий, поскольку они являются мощным источником генерации радона и торона.

Значимой проблемой республик Донбасса принято считать разрушения рельефа в форме горных выработок, приводящих к наложению на естественный радоновый фон техногенной составляющей от гамма-излучения терригенных радионуклидов, извлеченных с породой в процессе добычи угля и попавших в шахтные отвалы. При этом на радоновой обстановке деятельность горно-обогатительных предприятий вряд ли сказывается, поскольку по современным представлениям радон поступает к дневной поверхности с глубины 3–10 м [8, 9], и заброшенные штреки на уровнях 500–1000 м не должны влиять на радоновую ситуацию на поверхности, даже если в них и создаются благоприятные условия для накопления радона в крайне высоких концентрациях.

На наш взгляд, более очевидным примером техногенно-усиленного воздействия ПИИИ на население являются заброшенные пруды-отстойники шахтных вод. Даже после частичной рекультивации (засыпки слоем грунта) величина мощности дозы гамма-излучения, создаваемой перемещенными из недр радионуклидами, обычно в 5–7 раз выше величины природного радиационного фона.

На территории Луганской области первые системные исследования были выполнены в 2012–2014 гг. специалистами лаборатории радиационного контроля НПМСР «Опыт», которые провели обследование 400 помещений в дошкольных детских учреждениях, школах и лечебно-оздоровительных учреждениях. В результате было установлено, что в 62% помещений значения ЭРОА радона-222 превышают уровень действий, установленный НРБУ-97, а максимальные значения объемной активности  $^{222}\text{Rn}$  превысили

2000 Бк/м<sup>3</sup> для помещений первого этажа и 5800 Бк/м<sup>3</sup> – для полуподвальных и цокольных помещений [3].

С конца 2014 г. мониторинг радоноопасности застройки г. Луганска производился в основном преподавателями физико-математического института Луганского государственного педагогического университета. Измерения выполнялись аспирационным экспресс-методом с помощью радиометра дочерних продуктов радона «АТЛЕС-1М», разработанного в лаборатории «Опыт», прекратившей к тому времени свое существование.

На первом этапе проводилась оценка радоноопасности районов города путем измерения ЭРОА в частном одно- и двухэтажном жилье, а также на нижнем жилом этаже многоэтажных зданий в «закрытых» помещениях. Одновременно определялась мощность эффективной дозы гамма-излучения радионуклидов в материалах ограждающих конструкций (табл. 2).

Наиболее радоноопасным был признан Каменнобродский район, где в дальнейшем и проводились измерения второго этапа. В качестве объектов исследования были выбраны 4 из 5 дошкольных образовательных учреждений (ДОУ) данного района (табл. 3).

Все объекты исследования представляли двухэтажные кирпичные здания возрастом более 40 лет, не имеющие монолитного фундамента и подвальных помещений. Мгновенные измерения уровней радона производились во всех помещениях ДОУ с длительным пребыванием детей или работников учреждения.

При расчете годовой дозы облучения детей учитывался вклад внутреннего облучения радонном и его ДПР, а также внешнего гамма-фона помещений и территории ДОУ. Время пребывания детей в здании садика принималось 2000 ч/год, на его территории – 400 ч/год, коэффициент перехода от ЭРОА радона к дозе составлял 11,9 нЗв/(Бк·м<sup>-3</sup>·ч) согласно рекомендациям МАГАТЭ.

Таблица 2

## Результаты радиационного мониторинга территории Луганска

[Table 2]

## Results of radiation monitoring on Lugansk territory]

Район города [City district]	Тип зданий [Building type]	Число измерений [Number of measurements]	ЭРОА [CRn± DC <sub>Rn</sub> , Бк/м <sup>3</sup> ] EEVA [CRn± DC <sub>Rn</sub> , Bq/m <sup>3</sup> ]	МЭД <sub>пом.</sub> , мкЗв/ч [Effective dose rate indoors, μSv/h]
Артемовский [Artemovskiy]	Частное жилье [private housing]	50	13,7 ± 2,4	0,113
	Многоэтажное здание [Multi-storey building]	20	68,9 ± 39,1	0,118
Каменнобродский [Kamennobrodskiy]	Частное жилье [private housing]	192	240,4 ± 23,0	0,121
	Многоэтажное здание [Multi-storey building]	15	44,0 ± 7,0	0,115
Ленинский [Leninskiy]	Частное жилье [private housing]	78	33,6 ± 5,0	0,107
	Многоэтажное здание [Multi-storey building]	92	40,9 ± 5,6	0,117
Жовтневый [Zhovtneviy]	Частное жилье [private housing]	192	69,6 ± 3,7	0,115
	Многоэтажное здание [Multi-storey building]	94	24,8 ± 2,3	0,119

Таблица 3

## Результаты радиационного мониторинга ДОУ Каменнобродского района Луганска

[Table 3]

## Results of the radiation monitoring of children education facilities (CEF) in Kamennobrodskiy district of Lugansk

ДОУ, адрес [CEF, address]	ЭРОА, Бк/м <sup>3</sup> [EEVA Bq/m <sup>3</sup> ]	МЭД <sub>пом.</sub> , мкЗв/ч [Effective dose rate indoors, μSv/h]	МЭД <sub>ул.</sub> , мкЗв/ч [Effective dose rate outdoors, μSv/h]	Годовая доза Н, мЗв [Annual effective dose H, mSv]
ДОУ «Ясли-садик № 57», ул. Рудя, 91 [CEF "Nursery №57", Rudya st. 91]	220,7	0,115	0,125	5,53
«Детский сад № 10», ул. Рудя, 73, а [“Kindergarden №10”, Rudya st. 73a]	165,7	0,105	0,125	4,20
ДОУ «Ясли-садик комбинированного типа № 55», ул. 21-го МЮДа, 54 [CEF “Combined type nursery №55”, 21 MUD st. 54]	244,5	0,110	0,125	6,09
ДОУ «Ясли-садик № 97», ул. Артема, 100 [CEF “Nursery №97”, Artem st. 100]	27,0	0,115	0,125	0,92

Следует отметить, что существенное превышение контрольного уровня в 100 Бк/м<sup>3</sup> имело место на грунтах со средним содержанием природных радионуклидов. В лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИ строительной физики РААСН был выполнен гамма-спектрометрический анализ грунта с территории наиболее радоноопасного объекта – ясель-садика комбинированного типа № 55, по результатам которого удельная активность радия в грунте  $C_{Ra}$  составила около 35 Бк/кг при удельной эффективной активности естественных радионуклидов (ЕРН)  $A_{эф} \approx 105$  Бк/кг.

Поскольку мгновенные исследования не позволяют оценить суточные и сезонные вариации уровней радона в зданиях, то для верификации полученных результатов были проведены длительные измерения (3 месяца) ЭРОА радона в частном домостроении, расположенном в том же Каменнобродском районе в непосредственной близости от ДОУ «Ясли-садик комбинированного типа № 55» (рис. 1).

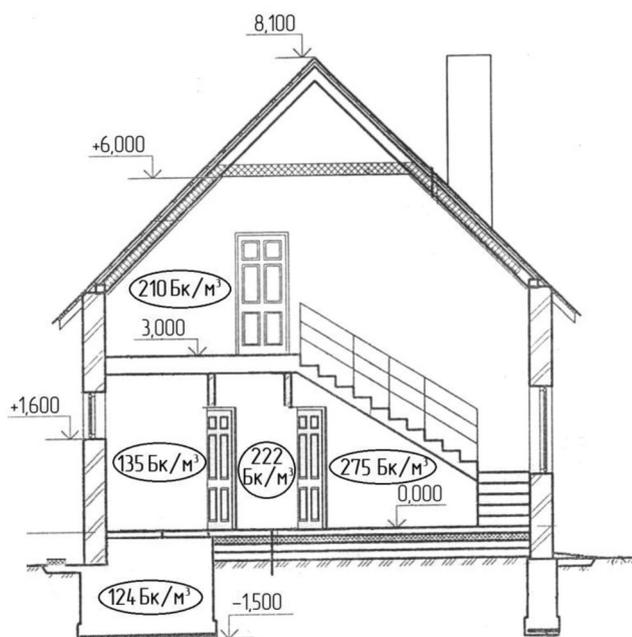


Рис. 1. Средние уровни радона в объекте исследования  
[Fig. 1. Average levels of radon in the surveyed building]

Объект исследования представлял двухэтажное здание, бетонная отмостка на щебеночном основании покрывала около половины поверхности грунта, вторая половина конструкции пола представляла радонопроницаемые деревянные полы на грунтовом основании. Усредненные за 3 месяца значения ЭРОА радона в жилых комнатах хорошо согласовывались с ранними результатами измерений концентрации радона в зданиях Каменнобродского района.

Повышенная радоноопасность сформированного мергелевыми глинами Каменнобродского района может объясняться значительной ролью конструктивных особенностей зданий. В данном районе большая часть фонда – это частные домостроения без монолитного фундамента, что и является причиной высоких внутренних концентраций радона при среднем содержании природных радионуклидов в подстилающих грунтах.

Радоновые исследования также были выполнены на территории педагогического университета, расположенного в Ленинском районе Луганска. По результатам более чем 700 измерений во всех учебных корпусах университета было установлено, что:

– среднее значение ЭРОА радона в учебных и служебных помещениях:

$$ЭРОА_{cp} = 53,3 \pm 3,8 \text{ Бк/м}^3;$$

– средняя мощность эффективной дозы внешнего гамма-излучения в учебных и служебных помещениях:

$$МЭД_{cp} = 0,102 \pm 0,002 \text{ мкЗв/ч.}$$

Кроме того, на территории студенческого городка было проведено 3 цикла измерений ЭРОА радона в атмосферном воздухе: в теплый и холодный период года (июль и ноябрь), а также после выпадения снежного покрова толщиной 40 см. Измерения проводились с интервалом в 1 ч с 7<sup>00</sup> до 19<sup>00</sup>, результаты исследования не выявили каких-либо суточных и сезонных закономерностей и корреляции уровней радона с климатическими параметрами. Среднее значение ЭРОА радона в атмосферном воздухе в самом центре Луганска составило:

$$C_{атм} = 14,4 \pm 5,9 \text{ Бк/м}^3.$$

Для июля, ноября и декабря значения ЭРОА района в атмосферном воздухе составили  $13,7 \pm 4,8$ ;  $13,1 \pm 9,5$  и  $16,4 \pm 4,4$  Бк/м<sup>3</sup> соответственно.

Радиационная ситуация в Запорожской области достаточно хорошо изучена благодаря совместным исследованиям Института гигиены и медицинской экологии им. О.М. Марзеева, Запорожского государственного медицинского университета и Запорожской областной санитарно-эпидемиологической станции [10]. Для расположенной на Украинском кристаллическом щите Запорожской области проблема радона достаточно акту-

альна, поскольку граниты с высоким содержанием урана формируют большие плотности потока радона с поверхности грунта.

Масштабное радоновое исследование методом пассивной трековой радонометрии охватило 221 ДООУ Запорожской области, в которых было установлено 250 накопительных камер. Его результаты позволили определить среднегеометрическое значение ЭРОА радона-222 в ДООУ области на уровне 167 Бк/м<sup>3</sup>, что почти в 3 раза превышает гигиенический норматив НРБУ-97/Д-2000 (табл. 4).

Таблица 4

## Уровни радона и дозы облучения детей в ДООУ Запорожской области [4]

[Table 4]

## Levels of radon and effective doses of children in CEF of Zaporozhye region [4]

Город/район [City/region]	ЭРОА <sub>min</sub> , Бк/м <sup>3</sup> [EEVA <sub>min</sub> Bq/m <sup>3</sup> ]	ЭРОА <sub>max</sub> , Бк/м <sup>3</sup> [EEVA <sub>max</sub> Bq/m <sup>3</sup> ]	Средняя геометрическая ЭРОА, Бк/м <sup>3</sup> [Mean geometric EEVA, Bq/m <sup>3</sup> ]	Эффективная доза от <sup>222</sup> Rn, мЗв/год [Effective dose from <sup>222</sup> Rn, mSv/year]
Бердянск [Berdyansk]	104	692	234	7,5
Запорожье [Zaporozhye]	59	178	102	3,3
Мелитополь [Melitopol]	66	301	131	4,2
Бердянский [Berdyanskiy]	98	399	224	7,2
Васильевский [Vasilevskiy]	34	345	147	4,7
Веселовский [Veselovskiy]	76	180	125	4,0
Вильнянский [Vilnyanskiy]	121	371	220	7,0
Гуляйпольский [Gulyaipolskiy]	224	403	304	9,8
Запорожский [Zaporozhskiy]	80	362	140	4,5
Каменка-Днипровский [Kamenka-Dniproviskiy]	93	198	136	4,4
Куйбышевский [Kuibishevskiy]	56	335	160	5,0
Мелитопольский [Melitopolskiy]	121	224	172	5,5
Михайловский [Mikhailovskiy]	278	541	358	11,5
Новониколаевский [Novonikolayevskiy]	101	334	168	5,3
Ореховский [Orekhovskiy]	131	449	260	8,3
Пологовский [Pologovskiy]	70	154	102	3,3
Приазовский [Priazovskiy]	45	232	125	4,0
Приморский [Primorskiy]	92	406	184	5,9
Токмакский [Tokmakskiy]	69	695	123	3,9

Город/район [City/region]	ЭРОА <sub>min</sub> , Бк/м <sup>3</sup> [EEVA <sub>min</sub> Bq/m <sup>3</sup> ]	ЭРОА <sub>max</sub> , Бк/м <sup>3</sup> [EEVA <sub>max</sub> Bq/m <sup>3</sup> ]	Средняя геометрическая ЭРОА, Бк/м <sup>3</sup> [Mean geometric EEVA, Bq/m <sup>3</sup> ]	Эффективная доза от <sup>222</sup> Rn, мЗв/год [Effective dose from <sup>222</sup> Rn, mSv/year]
Черниговский [Chernigovskiy]	19	449	137	4,4
Якимовский [Yakimovskiy]	111	403	171	5,5

Эффективная годовая доза облучения детей радоном и его ДПР в среднем по области составила 5,8 мЗв при диапазоне колебаний от 3,3 мЗв в Запорожье до 11,5 мЗв в Михайловском районе. Неприемлемо высокие дозы облучения детей характерны также для Гуляйпольского и Ореховского районов.

Последний из новых субъектов РФ – Херсонская область – практически не изучен на предмет облучения населения ПИИИ. По крайней мере, у авторов отсутствует какая-либо информация о проводившихся там исследованиях.

Херсонская область расположена в причерноморских степях и является классической равнинной территорией, не предполагающей аномально высоких уровней радона в зданиях. Характер радоновой обстановки в Херсонской области не должен существенно отличаться от районов степного Крыма, однако данное предположение требует экспериментальной проверки.

### Перспективы оптимизации радиационной защиты населения Российской Федерации при облучении ПИИИ

При проведении сравнительного анализа документов, регламентирующих радиационную безопасность при облучении ПИИИ на территории Российской Федерации и на территории новых ее субъектов до их вхождения в состав России, мы не упомянули одно значимое их сходство, а именно – ни действующие в настоящее время НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010, ни НРБУ-97/Д-2000 не являются гармонизированными с рекомендациями международных организаций, изложенными в Основных нормах безопасности МАГАТЭ «Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности» [11].

«Основами государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу»<sup>10</sup>, утвержденными Указом Президента Российской Федерации № 585 от 13 октября 2018 г., поставлена задача «совершенствования нормативно-правовой базы в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, в том числе критериев, принципов, системы нормирования и основных требований к обеспечению ядерной и радиационной безопасности с учетом стандартов и рекомендаций международных организаций в области использования атомной энергии».

В соответствии с поручением Президента Российской Федерации в рамках его послания Федеральному Собранию, Правительству Российской Федерации с 1 января 2021 г. предполагались отмена всех действующих нормативных правовых актов, устанавливающих требования, соблюдение которых подлежит проверке при осуществлении государственного контроля (надзора), и введение в действие новых норм, содержащих актуализированные требования, разработанных с учетом риск-ориентированного подхода и современного уровня технологического развития в соответствующих сферах (подпункт «б» пункта 3 перечня поручений Президента Российской Федерации (№ Пр-294 от 26 февраля 2019 г.) по реализации Послания Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации от 20 февраля 2019 г.) («регуляторная гильотина»); в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 31.12.2020 г. № 2467<sup>11</sup> срок действия НРБ-99/2009 был ограничен датой 01.09.2021 г.

В 2019–2021 гг. во исполнение Плана мероприятий («дорожная карта») по реализации механизма «регуля-

<sup>10</sup> Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу. Утверждены Указом Президента Российской Федерации № 585 от 13 октября 2018 г. [Basics of state policy in the field of provision of nuclear and radiation safety of the Russian Federation up to 2025 and further perspective. Approved by the Decree of the President of the Russian Federation No 585 (In Russ.)]

<sup>11</sup> Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 г. № 2467 «Об утверждении перечня нормативных правовых актов и групп нормативных правовых актов Правительства Российской Федерации, нормативных правовых актов, отдельных положений нормативных правовых актов и групп нормативных правовых актов федеральных органов исполнительной власти, правовых актов, отдельных положений правовых актов, групп правовых актов исполнительных и распорядительных органов государственной власти РСФСР и Союза ССР, решений Государственной комиссии по радиочастотам, содержащих обязательные требования, в отношении которых не применяются положения частей 1, 2 и 3 статьи 15 Федерального закона «Об обязательных требованиях в Российской Федерации»» [Decree of the Government of the Russian Federation No 2467 “On the establishment of list of legislative acts and groups of legislative acts of the Government of the Russian Federation, legislative acts, separate statements of legislative acts and groups of legislative acts of the federal offices of executive branch, legislative acts, separate statements of legislative acts and groups of legislative acts of the executive and legislative organs of state power of the RSFSR and USSR, decisions of the State commission on the radio frequencies, that include mandatory requirements that do not fall under the parts 1, 2 and 3 of article 3 of the Federal Law “On the mandatory requirements in the Russian Federation” (In Russ.)]

торной гильотины»<sup>12</sup> и Постановления Правительства РФ от 31.12.2020 г. № 2467 в профильных организациях Роспотребнадзора проводилась работа по актуализации санитарного законодательства Российской Федерации, в том числе – по переработке действующих санитарных правил НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010, а в части природного облучения – также СанПин 2.6.1.2800-10 (в составе Свода санитарных правил). В проектах новых актуализированных документов были удалены устаревшие (неактуальные) требования к обеспечению радиационной безопасности, требования, создающие избыточную административную нагрузку на субъекты предпринимательской деятельности, а также дублирующие положения, отраженные одновременно в нескольких документах; в проекты документов были добавлены актуальные в настоящее время требования по обеспечению радиационной безопасности при облучении ПИИИ, которые ранее в санитарном законодательстве РФ не рассматривались (например, радиационная безопасность населения при использовании природных минеральных вод). Вместе с тем, в проекты актуализированных документов не были введены положения, позволяющие в перспективе гармонизировать нормативно-методическую базу Российской Федерации с рекомендациями международных организаций. Например, принятая в международных документах [11,12] классификация «ситуаций облучения» (существующее, планируемое или аварийное) не могла быть использована в проектах отечественных санитарных правил, так как данный подход к облучению не предусмотрен действующим Федеральным законом от 09.01.1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения»<sup>13</sup>. По этой же причине невозможно было ввести в документы ряд новых понятий и определений, соответствующих глоссарию международных рекомендаций (например, «референтный уровень»).

Постановление Правительства РФ от 19.06.2021 г. № 944<sup>14</sup>, утвердив изменения к Постановлению Правительства РФ от 31.12.2020 г. № 2467, освободило санитарные нормы и правила по радиационной безопасности от «регуляторной гильотины», не ограничивая конкретной датой сроки действия НРБ-99/2009, ОСПОРБ 99/2010 и других санитарных правил, посвященных данным вопросам.

Поскольку вопрос о гармонизации отечественной нормативно-методической базы по радиационной безопасности с международными рекомендациями оставался открытым и начинать процесс внедрения международных

подходов к радиационной безопасности следовало с высшего законодательного уровня, Приказом Руководителя Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 06.04.2022 г. № 174<sup>15</sup> была создана рабочая группа по разработке проекта Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «О радиационной безопасности населения»». К настоящему времени рабочая группа, в состав которой входят и специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, представила в Роспотребнадзор проект документа, положения которого учитывают опыт международных организаций в вопросах обеспечения радиационной безопасности. Принятие Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «О радиационной безопасности населения»» «неминуемо повлечет за собой переработку всех соответствующих санитарных норм и правил; а переход к 3 ситуациям облучения даст новую оценку роли облучения населения за счет ПИИИ как основного фактора существующего облучения.

Таким образом, оптимизация радиационной защиты всего населения России, в том числе населения новых субъектов Российской Федерации, неразрывно связана с перспективой переработки отечественного санитарного законодательства и нормативной базы по обеспечению радиационной безопасности с учетом современных мировых тенденций и рекомендаций.

### Заключение

В условиях непрекращающихся военных действий на территории новых субъектов Российской Федерации (Донецкой и Луганской Народных Республик, Запорожской и Херсонской областей), безусловно, рано ожидать, что вопросам облучения населения за счет ПИИИ будет уделяться должное внимание на фоне глобальных угроз жизни и здоровью людей; в части радиационной безопасности также первоочередными задачами в данный момент являются проблемы недопущения аварийных ситуаций и преодоления последствий в случае их возникновения. Однако после возвращения регионов к мирной жизни, восстановления инфраструктуры и промышленности вопросы природного облучения населения как основного дозообразующего фактора облучения человека во всем мире займут свое место в обеспечении радиационной безопасности населения вновь образованных субъектов Российской Федерации с учетом новых реалий санитарного законодательства.

<sup>12</sup> План мероприятий («дорожная карта») по реализации механизма «регуляторной гильотины». Утвержден Правительством Российской Федерации 29.05.2019 г. № 4714п-П36 [Roadmap on the execution of the “regulatory guillotine”. Approved by the Government of the Russian Federation No 4714p-P36 (In Russ.)]

<sup>13</sup> Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» [Federal State Law No 3-FZ “On the radiation safety of the public” (In Russ.)]

<sup>14</sup> Постановление Правительства РФ от 19.06.2021 г. № 944 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросу совершенствования реализации имущества, обращенного в собственность государства, вещественных доказательств, изъятых вещей, а также товаров, задержанных таможенными органами, и признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» [Decree of the Government of the Russian Federation No 944 (In Russ.)]

<sup>15</sup> Приказ Руководителя Роспотребнадзора от 06.04.2022 г. № 174 «О создании рабочей группы по разработке проекта Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «О радиационной безопасности населения»» [Order of the Head of Rosпотребнадзор № 174 “On the establishment of the workgroup on the development of the project of Federal law “On the changes in the Federal law “On the radiation safety of the public” (In Russ.)]

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

Калайдо А.В. осуществлял общее научное руководство исследованием, проанализировал данные полевых исследований, выполнил расчет доз, провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кормановская Т.А. разработала дизайн исследования, определила цели и задачи, провела сравнительный анализ нормативных документов, отредактировала промежуточный вариант рукописи и представила окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

### Благодарности

Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания и предложения, которые позволили существенно улучшить качество статьи.

### Информация о конфликте интересов

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

### Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

### Литература

- Кормановская Т.А., Ахматдинов Р.Р., Горский Г.А. Итоги 20 лет функционирования Федерального банка данных по дозам природного облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 112–125. DOI 10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125.
- Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / ФБУН НИИ радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева; под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. Санкт-Петербург: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
- Орешкин М.В., Махнев И.А., Калайдо А.В. Мифы и реальность радиационной опасности в Луганской и Донецкой областях // Вестник аграрной науки Дона. 2014. № 4 (28). С. 74–80.
- Котов В.С., Марьенко Л.В., Сергиенко Л.В. Распределение радона-222 в воздухе помещений города Донецка // Архив клинической и экспериментальной медицины. 2016. Т. 25, № 2. С. 85–88.
- Котов В.С., Ермаченко А.Б., Садеков Д.Р. Радон-индуцированный канцерогенный риск для населения города Донецка // Вестник гигиены и эпидемиологии. 2020. Т. 24, № 3. С. 315–317.
- Бекман И.Н. Радон: враг, врач и помощник. Конспект лекций. URL: <http://profbeckman.narod.ru/rad.htm> (Дата обращения: 12.04.2023).
- Бекман И.Н. Радиоактивность, радионуклиды и радиация. Учебное пособие. М.: Palmarium academic publishing, 2013. 485 с.
- Микляев П.С., Петрова Т.Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2007. № 2. С. 2–17.
- Гулябанц Л.А., Калайдо А.В. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий: Монография, под ред. Шубина И.Л. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 232 с.
- Павленко Т.А., Костенецкий М.И., Куцак А.В., и др. Радон в дошкольных учреждениях Запорожской области и дозы облучения детей // Окружающая среда и здоровье. 2013. № 1. С. 49–53.
- Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 477 с.
- Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. (Опубликована в Официальном журнале Европейского Союза N L 13, 17.1.2014).

Поступила: 13.04.2023 г.

**Калайдо Александр Витальевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства и профессионального образования Луганского государственного педагогического университета, Луганск, Россия

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

**Для цитирования:** Калайдо А.В., Кормановская Т.А. Перспективы обеспечения радиационной безопасности при облучении природными источниками ионизирующего излучения на новых территориях Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 114–125. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-114-125

## Prospects of provision of radiation safety from natural sources of ionizing exposure on the new territories of the Russian Federation

Aleksandr V. Kalaydo<sup>1</sup>, Tatyana A. Kormanovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lugansk State Pedagogic University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia

<sup>2</sup>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

*This study is aimed at the analysis of perspectives of provision of radiation safety from natural sources of ionizing exposure on the territories included into the Russian Federation in 2022. The study contains comparison of the requirements of legislative acts and regulations on the radiation safety that were active in 4 new subjects of the Russian Federation (Donetsk and Lugansk republics, Zaporozhye and Kherson regions) on the time of their integration with their Russian equivalents. The results indicate the lack of harmonization between acting radiation safety sanitary acts of the Russian Federation and the Ukraine with recommendations of the international organizations. The study contains results of the surveys on the exposure of the public of the Donbass republics and Zaporozhye region by natural sources of ionizing exposure, analysis of the perspectives of the provision of radiation safety of the public of these regions and the Kherson region. Additionally the study includes the evaluation of the existing legislative base on the protection from natural sources of ionizing exposure in the Russian Federation and perspectives of harmonization with the recommendations of international organizations.*

**Key words:** Natural sources of ionizing exposure, radon, effective dose, norms of the radiation safety, harmonization.

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

Kalaido A.V. carried out general scientific management of the study, analyzed field data, performed dose calculations, searched and analyzed literature data, edited an intermediate version of the manuscript.

Kormanovskaya T.A. developed the design of the study, defined goals and objectives, conducted a comparative analysis of normative documents, edited the intermediate version of the manuscript and submitted the final version of the manuscript for publication in the journal.

### Acknowledgements

The authors are also grateful to the reviewers for constructive comments and suggestions that have significantly improved the quality of the manuscript.

### Conflict of interests

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

### Sources of funding

The study had no sponsorship.

### References

1. Kormanovskaya TA, Akhmatdinov RR, Gorsky GA. Results of the 20-year period of functioning of the Federal Databank on the natural radiation doses to the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 112-125. (In Russian). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125>
2. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, et al. Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic measures. Institute of Radiation Hygiene; edited by Academician of RAS G.G. Onischenko and prof. A.Yu. Popova. St-Petersburg: FBUN NIIRG after P.V. Ramzaev; 2018. 432 p. (In Russian).
3. Oreshkin MV, Makhnev IA, Kalaydo AV. Myths and reality of the radiation hazards in Lugansk and Donetsk regions. *Vestnik agrarnoy nauki Dona = Newsletter of agriculture science of Don*. 2014;4(28): 74–80. (In Russian).
4. Kotov VS, Marenko LV, Sergienko LV. Distribution of radon-222 in the air of the premises of Donetsk city. *Arkhiv klinicheskoy i eksperimental'noy meditsiny = Archive of clinical and experimental medicine*. 2016;25(2): 85–88. (In Russian).
5. Kotov VS, Ermachenko AB, Sadekov DR. Radon-induced cancer risk for population of Donetsk city. *Vestnik gigieny i epidemiologii = Newsletter of hygiene and epidemiology*. 2020;24(3): 315–317. (In Russian).
6. Bekman IN. Radon: enemy, physician and helper. Lectures. Available from: <http://profbeckman.narod.ru/rad.htm> (Accessed April 12, 2023)
7. Bekman IN. Radioactivity, radionuclide and radiation. Handbook. Moscow: Palmarium academic publishing; 2013. 485 p. (In Russian).
8. Miklyaev PS, Petrova TB. Mechanisms of radon flow from the soil surface and approaches to the assessment of radon hazard of residential areas. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy = Equipment and news of radiation measurements*. 2007;2: 2–17. (In Russian).
9. Gulabyants LA, Kalaydo AV. Anti-radon protection of residential and public buildings. Ed. by Shubin I.L. Moscow, Berlin, Direct-Media; 2020. 232 p. (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

10. Pavlenko TA, Kostenetsky MI, Kutsak AV, et al. Radon in the preschool facilities of Zaporozhye region and doses of children. *Okruzhayushchaya sreda i zdorovye = Environment and health*. 2013;1: 49–53. (In Russian).
11. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards GSR Part 3. IAEA, Vienna, 2015. – 518 p. (in Russian).
12. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. (Published in the Official Journal of the European Union N L 13, 17.1.2014).

Received: April 13, 2023

**Aleksandr V. Kalaydo** – Candidate of technical sciences, docent of the department of technology of production and professional education of Lugansk state pedagogical university, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia

**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)

**For citation: Kalaydo A.V., Kormanovskaya T.A. Prospects of provision of radiation safety from natural sources of ionizing exposure on the new territories of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 114-125. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-114-125**

## Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3–ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований». Предпосылки к переработке

А.В. Водоватов<sup>1,2</sup>, Л.А. Чипига<sup>1,3,4</sup>, А.А. Братилова<sup>1</sup>, П.С. Дружинина<sup>1</sup>, И.Г. Шацкий<sup>1</sup>,  
А.В. Петрякова<sup>1</sup>, С.С. Сарычева<sup>1</sup>, А.М. Библин<sup>1</sup>, Р.Р. Ахматдинов<sup>1</sup>, Ю.В. Капырина<sup>2</sup>,  
И.В. Солдатов<sup>6</sup>, В.Г. Пузырев<sup>2</sup>, С.А. Рыжов<sup>5,6,7</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

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

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

<sup>5</sup> Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Россия

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

<sup>7</sup> Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

*Анализ уровней облучения населения Российской Федерации источниками ионизирующего излучения является важной частью мероприятий, проводимых Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Информация о дозах облучения населения Российской Федерации при медицинском облучении на объектовом, региональном и федеральном уровнях собирается с использованием формы федерального статистического наблюдения № 3–ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований», действующей с 2000 г. За 20 лет использования формы № 3–ДОЗ она существенно не модернизировалась. В рамках решения коллегии Роспотребнадзора от 11.09.2020 г. проводилась комплексная программа по актуализации и модернизации формы № 3–ДОЗ, которая завершилась утверждением новой формы № 3–ДОЗ приказом Росстата № 880 от 30 ноября 2022 г., при этом форма № 3–ДОЗ претерпела значительные изменения, направленные на учет современного состояния лучевой диагностики в Российской Федерации. Целью данной работы являлся анализ основных компонентов системы сбора данных по уровням медицинского облучения, которые нуждались в доработке и актуализации в рамках переработки формы № 3–ДОЗ. Работа была выполнена с учетом результатов анализа объектовых и региональных форм № 3–ДОЗ за период 2015–2020 гг. По результатам работы были сформированы основные направления актуализации формы № 3–ДОЗ, реализованные в новом варианте формы.*

**Ключевые слова:** ЕСКИД, эффективная доза, форма № 3–ДОЗ, пациенты, медицинское облучение.

**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

Введённая в 2000 г. форма федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований» (далее – форма № 3-ДОЗ)<sup>1</sup> является основным инструментом для учета уровней облучения пациентов Российской Федерации при рентгеновской и радионуклидной диагностике. Форма № 3-ДОЗ является элементом единой системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД). Требование к необходимости контроля и учета доз облучения, в том числе при проведении медицинских рентгенорадиологических процедур, определено статьей 18 ФЗ № 3 «О радиационной безопасности населения». Положение и структура ЕСКИД регламентируются приказом Минздрава России от 31.07.2000 г. № 298, разработанным с целью реализации ст. 18 ФЗ № 3, а также во исполнение постановления Правительства Российской Федерации от 16.06.1997 г. № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [1, 2]. Форма № 3-ДОЗ подлежит заполнению всеми организациями, использующими источники ионизирующего излучения в медицинских диагностических целях, независимо от их ведомственной подчиненности, проводящими рентгенорадиологические диагностические исследования пациентов.

Функционально ЕСКИД представляет собой совокупность федеральной, региональной и ведомственных систем контроля и учета доз облучения граждан. В системе Роспотребнадзора в состав ЕСКИД входит федеральный банк данных (ФБД) по дозам облучения граждан при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических процедур (ФБДМ)<sup>2</sup>. ФБДМ создан на базе Федерального радиологического центра при ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Форма № 3-ДОЗ позволяет оценивать тренды изменения структуры лучевой диагностики и коллективных доз, обусловленных медицинским облучением населения РФ [3]. Материалы, полученные в ходе сбора форм № 3-ДОЗ, используются при подготовке радиационно-гигиенических паспортов территорий Российской Федерации, а также государственного доклада о санитарно-эпидемиологическом благополучии населения [4, 5]. Результаты анализа формы № 3-ДОЗ используются при подготовке ежегодных сборников «Дозы облучения населения Российской Федерации» [6]. Следует отме-

тить, что, несмотря на заявленную возможность контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан, форма № 3-ДОЗ позволяет оценивать либо коллективные дозы для рентгенорадиологических процедур/исследований (как совокупность индивидуализированных эффективных доз пациентов), либо средние эффективные дозы за рентгенорадиологическую процедуру/исследование (как результат деления коллективной дозы на число выполненных процедур/исследований).

Для сравнения, в большинстве зарубежных стран (страны Евросоюза, США, Япония и пр.) сбор данных об уровнях облучения пациентов и структуре исследований в лучевой диагностике организуются 1 раз в 5–10 лет, в отличие от Российской Федерации, где это делается ежегодно [7–9]. При этом сбор данных в зарубежных странах проводится в 20–60% медицинских организаций; участие в сборе данных является добровольным. Например, при подготовке обзора о дозах медицинского облучения в США в 2019 г. [9] были использованы данные коммерческих консалтинговых организаций, государственной системы медицинского страхования, информация от частных страховых компаний, сведения из федеральной администрации по пищевым продуктам и лекарственным препаратам и пр., что позволило охватить менее 60% медицинских организаций. Такой подход не позволяет получить полную репрезентативную картину о состоянии медицинского облучения населения. Также следует отметить, что при подготовке очередного отчета НКДАР ООН «Источники и эффекты ионизирующего излучения» [10] в разделе «Медицина» только Российская Федерация смогла представить полную информацию по структуре и уровням облучения для всех видов лучевой диагностики.

В ряде стран бывшего СССР (Беларусь, Казахстан, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан и Кыргызстан) аналогичные российским требования к контролю и учету индивидуальных доз облучения за счет медицинских источников ионизирующего излучения внедрены в законодательные акты по обеспечению радиационной безопасности.

Наиболее комплексная система сбора и анализа данных реализована в Беларуси, где утверждена национальная форма № 3-ДОЗ «Дозы облучения лиц, подвергшихся медицинскому облучению в целях диагностики и (или) лечения заболеваний»<sup>3</sup>. На базе Государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека» в рамках Единой государственной системы учета доз облучения населения и профессионального облучения создан

<sup>1</sup> Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 31 июля 2000 г. № 298 «Об утверждении Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation №298, 31.07.2000 “On the establishment of the Status on the joint state system of control and accounting of individual doses of citizens” (In Russ.)]

<sup>2</sup> Приказ Минздрава РФ от 01.11.2002 г. № 333 «О создании федерального банка данных единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation №333, 01.11.2002 “On the establishment of federal databank of the joint state system of control and accounting of individual doses of citizens” (In Russ.)]

<sup>3</sup> Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 27 ноября 2020 г. № 110 «О порядке учета доз облучения, полученных населением и персоналом» [Decree of the Ministry of Healthcare of the Republic of Belarus № 110, 27.10.2020 “On the order of accounting of public and staff doses” (In Russ.)]

Государственный дозиметрический регистр<sup>4</sup>. Детальные сведения о системах сбора данных в других странах бывшего СССР в открытых источниках отсутствуют.

Таким образом, форма № 3-ДОЗ является без преувеличения уникальным на мировом уровне инструментом для оценки национальных уровней медицинского облучения населения. Однако за 20 лет использования формы № 3-ДОЗ она существенно не модернизировалась. К 2020 г., согласно данным исследований ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, который является головным учреждением по обработке и анализу информации, собираемой в рамках формы № 3-ДОЗ, созрела необходимость ее комплексной переработки, направленной на учет специфики современных методов лучевой диагностики, расширение объема, изменение номенклатуры собираемых данных и повышение достоверности предоставляемых данных [1, 11, 12]. Задача актуализации формы № 3-ДОЗ была поставлена решением коллегии Роспотребнадзора от 11.09.2020 г.

**Цель исследования** – анализ основных компонентов системы сбора данных по медицинскому облучению, которые нуждались в доработке и актуализации в рамках переработки формы № 3-ДОЗ.

Работа была основана на анализе данных, полученных из Федерального банка данных по индивидуальным дозам облучения граждан при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических процедур (ФБДМ). Дополнительно были проанализированы обращения юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и федеральных органов исполнительной власти в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева по внесению изменений и дополнений в форму № 3-ДОЗ, а также результаты обсуждения формы № 3-ДОЗ с представителями организаций управления здравоохранением.

Выборочная верификация данных из объектовых форм № 3-ДОЗ проводилась для отдельных регионов и медицинских организаций, в рамках научно-исследовательских работ, выполненных лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в период 2015–2020 гг. [3, 13–18]. По результатам проведенного анализа были определены ключевые недостатки формы № 3-ДОЗ, действовавшей до 2022 г. (далее – «старая» форма № 3-ДОЗ). На основании проведенного анализа был предложен и реализован ряд изменений в форме № 3-ДОЗ.

### Изменения в структуре формы № 3-ДОЗ

Одним из основных недостатков «старой» формы № 3-ДОЗ являлось отсутствие учета данных по отдель-

ным рентгенорадиологическим исследованиям (РРИ), ассоциированным с высокими (вплоть до 100 и более мЗв за исследование) дозами облучения пациентов. К данным исследованиям относятся компьютерная томография (КТ) с применением рентгеноконтрастных препаратов; КТ нескольких анатомических областей (грудная клетка + брюшная полость; брюшная полость + таз; грудная клетка + брюшная полость + таз), в том числе и с применением рентгеноконтрастных препаратов; большая часть интервенционных и рентгенохирургических исследований; а также радионуклидные диагностические исследования, совмещенные с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ; ОФЭКТ/КТ).

Данные исследования либо не учитывались в «старой» форме № 3-ДОЗ вообще, либо учитывались совместно с обычными исследованиями соответствующей анатомической области, либо заносились в раздел «Прочие исследования». Данное обстоятельство негативно сказывалось на возможности оценить коллективную дозу и средние эффективные дозы от данных видов исследований, а также определить их вклад в структуру лучевой диагностики в Российской Федерации.

Результаты анализа средних эффективных доз для различных РРИ, представленных на сайте ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева<sup>5</sup>, показали, что ни для одного вида РРИ, в том числе и для высокодозовых, средняя эффективная доза не превышает 10 мЗв. Это существенно расходится с данными, представленными в отечественных [17–19] и зарубежных источниках [20].

Также следует выделить чрезмерное укрупнение и обобщение представления данных в «старой» форме № 3-ДОЗ для интервенционных и рентгенохирургических исследований, а также для диагностических радионуклидных исследований. Все РРИ структурированы по комбинации вида исследования (например, «специальные») и анатомической области исследования (например, «органы грудной клетки»). В то же время для данной комбинации вида исследования и анатомической области могут выполняться РРИ, существенно отличающиеся по структуре, параметрам проведения и, как следствие, по уровням облучения пациентов. Например, к «специальным» исследованиям органов грудной клетки будут относиться аортокоронарное шунтирование, постановка кардиостимулятора/водителя ритма, стентирование сосудов сердца. В радионуклидной диагностике из-за отсутствия градации исследований в один раздел может попадать целый спектр радиофармацевтических препаратов (РФП), меченных различными радионуклидами, средние эффективные дозы от которых будут отличаться вплоть до порядка величины [21–23].

<sup>4</sup> Государственный дозиметрический регистр РНПЦ радиационной медицины и экологии человека <https://www.rcrm.by/science/gosudarstvennyy-dozimetriceskiy-registr/> Онлайн-ресурс. (Дата обращения 22.05.2023 г.) [State dosimetry register of RNPС Radiation medicine and human ecology. <https://www.rcrm.by/science/gosudarstvennyy-dozimetriceskiy-registr/> Online resource. (Accessed 22.05.2023.) (In Russ.)]

<sup>5</sup> Рекомендованные для использования средние значения индивидуальных эффективных доз пациентов для различных рентгенодиагностических процедур при заполнении раздела расчетных доз в Форме № 3-ДОЗ за 2021 год. [http://niirg.ru/PDF/2022/Tabl\\_avg\\_dose2021.pdf](http://niirg.ru/PDF/2022/Tabl_avg_dose2021.pdf) Онлайн-ресурс. (Дата обращения 22.05.2023 г.) [Recommended mean values of individual effective patient doses for various X-ray procedures to be used to fill the calculated part of form № 3-DOZ in 2021. [http://niirg.ru/PDF/2022/Tabl\\_avg\\_dose2021.pdf](http://niirg.ru/PDF/2022/Tabl_avg_dose2021.pdf) Online resource. (Accessed 22.05.2023.) (In Russ.)]

Для устранения данного недостатка при переработке формы № 3-ДОЗ были выделены в виде отдельных комбинаций столбцов и строк все наиболее распространенные высокодозовые РРИ (например, КТ нескольких анатомических областей, интервенционные процедуры на сердце, ПЭТ-/КТ-исследования и пр.). Существенно расширен и переработан раздел по интервенционным (специальным) РРИ, полностью переработаны подходы к номенклатуре диагностических радионуклидных исследований. В переработанной форме № 3-ДОЗ отдельно выделены все типы высокодозовых РРИ, ассоциированных с дозами выше 20 мЗв за исследование; в частности, отдельно выделены компьютерные томографии с внутривенным контрастированием.

### Гармонизация различных форм государственной статистической отчетности

Дополнительные неудобства при заполнении «старой» формы № 3-ДОЗ в медицинских организациях вызывала группировка рентгенорадиологических исследований по анатомическим областям и видам исследований, не гармонизированная с их классификацией, представленной в форме № 30 Минздрава РФ<sup>6</sup> и других статистических формах системы здравоохранения и страховых компаний. Это приводит к существенным различиям в количестве и структуре РРИ, полученных из различных источников.

Основной отчетной формой для сравнения с формой № 3-ДОЗ является форма № 30 «Сведения о медицинской организации». Анализ структуры таблиц формы № 30 показывает, что для ряда видов лучевой диагностики (рентгенографии, рентгеноскопии) группировка исследований по анатомическим областям выполнена крайне упрощенно; для ряда других исследований (компьютерной томографии, интервенционных исследований) – наоборот, достаточно детально.

Например, для рентгенографических и рентгеноскопических исследований в таблице 5100 формы № 30 выделяют исследования органов грудной клетки, органов пищеварения (пищевода, желудка и тонкой кишки, ободочной и прямой кишки), костно-суставной системы (шейного и грудного отдела позвоночника, поясничного и крестцового отдела позвоночника) и прочих органов и систем (черепа, зубов, почек и молочных желез). Данная группировка является более примитивной, чем представлено в форме № 3-ДОЗ.

Напротив, сведения по интервенционным вмешательствам под лучевым контролем в таблице 5111 формы № 30 (специальным исследованиям в соответствии с классификацией формы № 3-ДОЗ) представлены чрезвычайно детально. Классификация исследований выполнена не по анатомическим областям, а по конкретным органам. Все исследования разделены на внутрисосудистые (ангиографии и рентгеноэндоваскулярные процедуры) и внесосудистые (хирургические процедуры под контролем рентгеновской медицинской визуализации).

При переработке формы № 3-ДОЗ особое внимание было уделено ее гармонизации с формой № 30, так как их заполнение и сдача в медицинской организации ведется синхронно. Для этого в первую очередь был переработан раздел по интервенционным (специальным) исследованиям с введением классификации, аналогичной форме № 30 (диагностика/терапия, внутри- и внесосудистые исследования). Раздел по компьютерной томографии также был скорректирован для гармонизации с формой № 30. Для рентгенографических и рентгеноскопических исследований была оставлена старая классификация, так как она является более подробной по сравнению с формой № 30. Для диагностических радионуклидных исследований была разработана новая классификация, отличающаяся как от «старой» формы № 3-ДОЗ, так и от формы № 30. Особенностью предложенной классификации радионуклидных исследований является группировка исследований как по анатомическим областям (органам-мишеням), так и по радионуклидам, что позволяет выделять исследования, существенно отличающиеся по дозам облучения пациентов.

### Выделение РРИ, выполняемых пациентам-детям

Общим недостатком обеих форм статистического учета в лучевой диагностике («старой» формы № 3-ДОЗ и формы № 30) являлось отсутствие выделения РРИ, выполненных пациентам-детям. Дети являются самой радиочувствительной категорией пациентов; необходимость отдельно учитывать структуру РРИ и коллективные/средние дозы от различных РРИ, выполняемых детям, отдельно выделяется международными регулирующими организациями [10]. До внесения изменений в форму № 3-ДОЗ сведения по пациентам-детям были недоступны; проводить оценку уровней облучения пациентов-детей было возможно только по результатам отдельных сборов данных, выполнявшихся локально.

Одним из результатов интерпретации коллективной дозы медицинского облучения является оценка радиационных рисков. Публикация 147 МКРЗ признала возможность использования эффективной дозы с учетом поправок на вариации риска в зависимости от возраста и неопределенности оценки риска при воздействии малых доз для оценки радиационного риска [24]. Выделение доз облучения пациентов-детей позволяет оценивать риски возникновения радиационно-индуцированных новообразований и наследственных эффектов с учетом поправки на возраст.

При переработке формы № 3-ДОЗ таблицы по учету числа РРИ и коллективной дозы от данных РРИ были разделены на 2 части: для взрослых пациентов (18+ лет) и пациентов-детей (от 0 до 18 лет). Данное деление соответствует действующим методическим рекомендациям по оценке радиационного риска при медицинском облучении.

<sup>6</sup> Годовая форма № 30 «Сведения о медицинской организации». <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=44&documentId=45678&from=similarforms> Онлайн-ресурс. (Дата обращения 22.05.2023 г.) [Annual form № 30 "Data on the medical facility". <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=44&documentId=45678&from=similarforms> Online resource. (Accessed 22.05.2023.) (In Russ.)]

**Проблемы при заполнении формы № 3-ДОЗ с использованием типичных значений средних эффективных доз, представленных в методических рекомендациях по заполнению формы № 3-ДОЗ**

Верификация данных по средним эффективным дозам пациентов, проведенная в период 2019–2021 гг. в Ленинградской области, показала, что для флюорографических, рентгенографических и КТ-исследований значения средних эффективных доз в отдельных медицинских организациях, оцененные по результатам собственного сбора данных, отличаются от данных из соответствующих объектовых форм № 3-ДОЗ вплоть до порядка величины [14–15, 23]. Аналогичные данные получены в результате исследований, проведенных в г. Москве [3, 13].

Несмотря на постоянный рост числа медицинских организаций/субъектов Российской Федерации, заполняющих форму № 3-ДОЗ по результатам измерений (по данным протоколов расчета средних эффективных доз пациентов, выполненных на основе измеренных дозовых характеристик) [6], анализ объектовых/субъектовых форм № 3-ДОЗ за последние 5 лет показывает, что средние эффективные дозы пациентов для 40% регионов Российской Федерации совпадают со значениями типовых доз для рентгенорадиологических исследований, представленных в методических рекомендациях по заполнению формы № 3-ДОЗ. Эти данные могут отличаться от реальных уровней облучения пациентов, сложившихся в данной медицинской организации или в данном субъекте Российской Федерации.

Следует отметить, что наличие так называемой «расчетной»<sup>7</sup> части формы № 3-ДОЗ (таблиц 1000 и 1100) исторически было обусловлено отсутствием в ряде медицинских организаций как клинических дозиметров, так и систематического определения радиационного выхода рентгеновских аппаратов в рамках контроля эксплуатационных параметров. По собственным данным ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, количество рентгеновских аппаратов в Российской Федерации, оснащенных измерителями доз облучения пациентов, составляет 20–40% от общего числа рентгеновских аппаратов.

В соответствии с действующим СанПиН 2.6.1.2891-11<sup>8</sup> все рентгеновские аппараты для проведения рентгеноскопических и интервенционных (рентгенохирургичес-

ких) исследований должны быть оснащены клиническими дозиметрами. Аналогичное требование присутствует и для КТ, в которых определение дозовых характеристик для каждого пациента производится с использованием встроенного программного обеспечения томографа. Также в соответствии с п. 2.8. СанПиН 2.6.1.1192-03<sup>9</sup> должно быть предусмотрено определение индивидуальных доз облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований.

Результаты анализа вклада числа РРИ, коллективные дозы для которых были определены так называемым «расчетным» путем, в общее число РРИ для всех субъектов Российской Федерации, выполненного ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева за период 2015–2021 гг., показали, что в 7 субъектах Российской Федерации (Республика Алтай, Республика Ингушетия, Республика Калмыкия, Чукотский автономный округ, Республика Северная Осетия – Алания, Республика Дагестан, Сахалинская область) 100% эффективных доз для КТ-исследований являются «расчетными». Еще в 22 субъектах Российской Федерации вклад «расчетных» эффективных доз составляет более 50%. Аналогичная ситуация наблюдается для рентгеноскопических и специальных (интервенционных) исследований.

Для вышеуказанных категорий РРИ использование так называемых «типичных» эффективных доз (усредненных табличных значений эффективных доз) для оценки коллективных доз неприемлемо, так как методика выполнения таких РРИ, продолжительность облучения пациента и структура исследования существенно отличаются (фактически – индивидуальны) для каждого пациента. Следует отметить, что в методических рекомендациях по заполнению формы № 3-ДОЗ<sup>10</sup> указано, что использование «типичных» эффективных доз «противоречит требованиям статьи 18 Федерального закона «О радиационной безопасности населения» и СанПиН 2.6.1.1192-03. Поэтому заполнение таблицы 1000 формы допускается временно, как исключение. Во всех медицинских учреждениях должны вестись контроль и учет индивидуальных доз облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований».

В связи с этим к актуализированной форме № 3-ДОЗ не будут прилагаться «типичные» дозы для наиболее высокодозовых исследований: КТ с контрастом и специальных (интервенционных) исследований.

<sup>7</sup> Дозы, полученные с использованием статистических данных о количестве проведенных в отчетном году рентгенологических процедур, при которых не проводился контроль и учет индивидуальных доз облучения пациентов [doses assessed using the statistical data on the number of performed X-ray examinations without control and accounting of individual patient doses]

<sup>8</sup> СанПиН 2.6.1.2891-11 «Требования радиационной безопасности при производстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации (утилизации) медицинской техники, содержащей источники ионизирующего излучения» [SanPiN 2.6.1.2891-11 “Requirements on radiation safety for production, operation and decommissioning (utilization) of the medical equipment with sources of ionizing exposure”. (In Russ.)]

<sup>9</sup> СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» [SanPiN 2.6.1.1192-03 “Hygienic requirements for planning and operation of X-ray rooms, units and conduction of X-ray examinations” (In Russ.)]

<sup>10</sup> Методические рекомендации № 2.6.1. ... -14 «Заполнение формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ». [http://niirg.ru/PDF/MR\\_3-DOS\\_2013.pdf](http://niirg.ru/PDF/MR_3-DOS_2013.pdf) Онлайн-ресурс. (Дата обращения 22.05.2023 г.) [Methodical recommendations № 2.6.1. ... -14 “Completion of form of federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ”. [http://niirg.ru/PDF/MR\\_3-DOS\\_2013.pdf](http://niirg.ru/PDF/MR_3-DOS_2013.pdf) Online resource. (Accessed 22.05.2023.) (In Russ.)]

### Актуализация программного обеспечения для заполнения формы № 3-ДОЗ

В 2023 г. специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева осуществляется переработка программного обеспечения для заполнения формы № 3-ДОЗ на основе программной среды Microsoft Visual FoxPro 6.0. Для облегчения заполнения новой формы № 3-ДОЗ программное обеспечение сохранит привычный интерфейс. Новые версии программ будут доступны для бесплатного скачивания на официальном сайте ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева [www.niirg.ru](http://www.niirg.ru) в декабре 2023 г. Приоритетным направлением переработки является необходимость переноса формы № 3-ДОЗ на современную отечественную программную платформу для автоматизации процесса передачи данных в региональные и федеральные банки данных. В качестве дополнительной задачи выступает необходимость обеспечить совместимость программного обеспечения на объектовом уровне с системами внутрибольничного электронного документооборота и электронными системами хранения данных в лучевой диагностике. Это позволит автоматизировать процесс заполнения формы № 3-ДОЗ в медицинских организациях, что существенно сократит временные и трудовые затраты на работу с данными по уровням облучения пациентов, повысит достоверность данных и позволит значительно сократить число процедурных ошибок. В дальнейшем предполагается переработка программного обеспечения для обеспечения пользователям возможности дистанционного заполнения и сдачи новой формы 3-ДОЗ посредством сети Интернет.

### Заключение

В ходе переработки формы № 3-ДОЗ были решены следующие задачи:

- скорректирована и изменена структура таблиц формы № 3-ДОЗ с выделением в отдельные графоклетки высокодозовых исследований: КТ с применением рентгеноконтрастных препаратов; КТ нескольких анатомических областей (грудная клетка + брюшная полость; брюшная полость + таз; все тело), интервенционных и рентгенохирургических исследований;
- переработан раздел по радионуклидной диагностике с переходом на предоставление информации по уровням облучения пациентов при использовании отдельных радионуклидов с выделением гибридных исследований (ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ);
- классификация компьютерно-томографических и интервенционных (специальных) исследований гармонизирована с формой № 30 Минздрава;
- внедрены отдельные таблицы с информацией о числе РРИ и коллективных дозах для детских пациентов;
- сокращено количество исследований, для которых представлены типичные («средние») эффективные дозы пациентов;
- модернизировано программное обеспечение для заполнения формы № 3-ДОЗ на объектовом и региональном уровнях.

Ожидается, что выполненная работа приведет к значительному повышению объема, детализации и достоверности собираемых данных по уровням облучения населения Российской Федерации при медицинском облучении.

Более детальная информация о структуре актуализированной формы № 3-ДОЗ с рекомендациями по ее заполнению будет представлена в следующей работе авторов.

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

Водоватов А.В. разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, написал черновик рукописи и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнале.

Чипига Л.А. разрабатывала изменения в структуру представления данных о радионуклидной диагностике в форме № 3-ДОЗ, подготовила разделы по изменениям представления данных по радионуклидной диагностике.

Братилова А.А. выполнила анализ текущего состояния формы № 3-ДОЗ, редактировала промежуточный вариант рукописи.

Дружинина П.С. разрабатывала изменения в структуру представления данных о компьютерной томографии, участвовала в подготовке разделов рукописи по компьютерной томографии.

Шацкий И.Г. разрабатывал разделы формы № 3-ДОЗ по пациентам-детям, подготовил раздел рукописи по пациентам-детям.

Петрякова А.В. разрабатывала изменения в структуру представления данных о радионуклидной диагностике в форме № 3-ДОЗ, участвовала в подготовке разделов рукописи по радионуклидной диагностике.

Сарычева С.С. разрабатывала изменения в структуру представления данных по интервенционным исследованиям в форме № 3-ДОЗ, участвовала в подготовке разделов рукописи по интервенционным исследованиям.

Библин А.М. осуществлял общее руководство исследованием, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Ахматдинов Р.Р. подготовил раздел рукописи по изменениям в программном обеспечении для заполнения формы № 3-ДОЗ.

Капырина Ю.В. разрабатывала изменения в структуру представления данных по интервенционным исследованиям для пациентов-детей в форме № 3-ДОЗ, участвовала в подготовке разделов рукописи по интервенционным исследованиям.

Солдатов И.В. выполнил работы по гармонизации формы № 3-ДОЗ со статистическими формами Минздрава, подготовил соответствующий раздел рукописи.

Пузырев В.Г. выполнил работы по гармонизации формы № 3-ДОЗ со статистическими формами Минздрава, подготовил соответствующий раздел рукописи.

Рыжов С.А. провел поиск и анализ литературных данных, редактировал промежуточный вариант рукописи.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках НИР «Совершенствование и развитие методов сбора сведений о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований в Российской Федерации с учетом утверждения новой формы 3-ДОЗ»

## Литература

1. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 7-17. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17>.
2. Барковский А.Н., Кормановская Т.А., Водоватов А.В., и др. Формирование блока данных об уровнях облучения населения России для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 134-141. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-134-141>.
3. Рыжов С.А., Водоватов А.В., Солдатов И.В., и др. Предложения по совершенствованию системы радиационной безопасности при медицинском облучении. Часть 1. Анализ информации, содержащейся в государственных отчетных формах и информационных базах данных, на примере города Москвы // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 92-109. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-92-109>.
4. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 6-24. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24>.
5. Роспотребнадзор. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 256 с.
6. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году: справочник. СПб, 2022. 76 с.
7. Radiation protection № 180 part 1/2. Medical Radiation Exposure of the European Population. European Commission, Luxembourg, 2014. 181 p.
8. Hart D., Hillier M.C., Shrimpton P.C. Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK – 2010 Review. HPA-CRCE-034., Health Protection Agency, 2012. 87 p.
9. NCRP report 184. Medical radiation exposure of patients in the United States. Recommendations of the national council on radiation protection and measurements. USA, Bethesda, 2019. 310 p.
10. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly. Scientific Annex A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation. United Nations, New York, May 2022. 344 p.
11. Водоватов А.В. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 47-55. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55>.
12. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 6-24. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24>.
13. Дружинина Ю.В., Водоватов А.В., Охрименко С.Е. Сравнительный анализ эффективных доз, рассчитанных по разным методикам, для пациентов при проведении исследований на рентгенодиагностических аппаратах общего назначения // Гигиена и санитария. 2022. № 101(2). С. 124-131.
14. Историк О.А., Водоватов А.В., Романович И.К., и др. Анализ уровней облучения населения Ленинградской области в лучевой диагностике за период 2010-2019 гг. // Медицина и организация здравоохранения. 2022. Т. 7, № 4. С. 80-95.
15. Водоватов А.В., Историк О.А., Романович И.К., и др. Анализ структуры и аппаратного парка лучевой диагностики в Ленинградской области за период 2010-2019 гг. // Медицина и организация здравоохранения. 2021. Т. 6, № 2. С. 43-64.
16. Druzhinina P.S., Istoriok O.A., Eremina L.A., et al. Comparison of different approaches for estimating patient effective doses in the Leningrad region // AIP Conference Proceedings 2250. 2020. 020009 <https://doi.org/10.1063/5.0013280>.
17. Balonov M., Golikov V., Zvonova I., et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015 // Journal of Radiological Protection. Vol. 38, № 121. P. 121-140. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99>.
18. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А., и др. Современные уровни медицинского облучения в России // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 67-79.
19. Chipiga L.A., Bernhardsson C. Patient doses in Computed Tomography examinations in two regions of the Russian Federation // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol 169, No 1-4. P. 240-244.
20. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly. Scientific Annex A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation. United Nations, New York, May 2022, 344 p.
21. Zvonova I.A., Chipiga L.A. Trends on medical exposure and radiation protection in nuclear medicine in Russia // Proceedings of International Conference on Radiation Protection in Medicine: Achieving Change in Practice. Vienna, 2017. IAEA, book of contributions. P. 188–192. <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpop-session4.pdf>.
22. 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>.
23. Chipiga L., Vodovатов A., Zvonova I., Bernhardsson C. Assessment of patient doses and possible approaches for implementation of optimization procedures in PET/CT examinations in the Russian Federation // Proceedings of the 13th international conference on «Medical Physics in the Baltic States» (Kaunas, 9-11 November 2017). 2017. P. 36 – 40.
24. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147 // Annals of the ICRP. 2021. Vol. 50, No 1. ICRP, Bethesda, 2022.

Поступила: 03.02.2023 г.

**Водоватов Александр Валерьевич** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: vodovatoff@gmail.com

**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; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Минздрава России; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

**Братилова Анжелика Анатольевна** – старший научный сотрудник, исполняющая обязанности заведующего лабораторией внутреннего облучения, 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

**Дружинина Полина Сергеевна** – младший 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

**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

**Петрякова Анастасия Валерьевна** – исполняющая обязанности младшего научного сотрудника, 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

**Сарычева Светлана Сергеевна** – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Библин Артем Михайлович** – старший научный сотрудник, руководитель информационно-аналитического центра, 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

**Ахматдинов Рустам Расимович** – инженер-исследователь, информационно-аналитический центр, 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

**Капырина Юлия Николаевна** – ассистент кафедры общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

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

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

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

**Для цитирования:** Водоватов А.В., Чипига Л.А., Братилова А.А., Дружинина П.С., Шацкий И.Г., Петрякова А.В., Сарычева С.С., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р., Капырина Ю.В., Солдатов И.В., Пузырев В.Г., Рыжов С.А. Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований». Предпосылки к переработке // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 126-136. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-126-136

## Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ “Data on patient doses from medical X-ray examinations”. Perquisites for the update

Aleksandr V. Vodovatov<sup>1,2</sup>, Larisa A. Chipiga<sup>1,3,4</sup>, Anzhelika A. Bratilova<sup>1</sup>, Polina S. Druzhinina<sup>1</sup>, Ilya G. Shatskiy<sup>1</sup>, Anastasiya V. Petryakova<sup>1</sup>, Svetlana S. Sarycheva<sup>1</sup>, Artem M. Biblin<sup>1</sup>, Rustam R. Akhmatdinov<sup>1</sup>, Yulia N. Kapyrina<sup>2</sup>, Ilya V. Soldatov<sup>6</sup>, Victor G. Puzyrev<sup>2</sup>, Sergey A. Ryzhov<sup>5,6,7</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

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

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

<sup>5</sup>Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

<sup>6</sup>Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

<sup>7</sup>Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

*Analysis of levels of exposure of public of the Russian Federation by sources of ionizing exposure is one of main parts of the activities conducted by the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing. Data on the doses of public of the Russian Federation from medical exposure on facility, regional and federal levels is collected using the form of federal governmental statistical surveillance № 3-DOZ “Data on patient doses from medical X-ray examinations”, that is active since 2000. For the last 20 years there were no significant updates of the form № 3-DOZ. According to the decision of the Board of the Rospotrebnadzor from 11.09.2020, a complex program on update and modernization of form № 3-DOZ was initiated, that has resulted in the approval of new form № 3-DOZ by the order of Rosstat № 880. The form has been significantly changed to reflect the modern condition of X-ray diagnostics in the Russian Federation. The aim of the current study was to analyze main components of medical exposure dose data collection system that required update and modernization. The study was performed based on the results of assessment of the forms № 3-DOZ from different medical facilities and regions in 2015–2020. The results of the study allowed developing main approaches to the update of the form № 3-DOZ that were implemented in a new edition of the form.*

**Key words:** Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens, effective dose, form № 3-DOZ, patients, medical exposure.

### Personal contribution of authors

Vodovatov A.V. developed design of the study, determined aims and objectives, prepared draft of the manuscript and presented the final version of manuscript for submission.

Chipiga L.A. developed the changes in the structure of data on diagnostic nuclear medicine in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on nuclear medicine.

Bratilova A.A. performed analysis of the current state of form № 3-DOZ, edited the draft versions of the manuscript.

Druzhinina P.S. developed the changes in the structure of data on computed tomography in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on computed tomography.

Shatskiy I.G. developed the changes in the structure of data on pediatric patients in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on pediatric exposure.

Petryakova A.V. developed the changes in the structure of data on diagnostic nuclear medicine in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on nuclear medicine.

Sarycheva S.S. developed the changes in the structure of data on interventional examinations in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on interventional examinations.

Biblin A.M. was responsible for the management of the study, edited draft versions of the manuscript.

Akhmatdinov R.R. prepared section on the changes in software.

Kapyrina Yu.V. developed the changes in the structure of data on interventional examinations in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on interventional examinations.

### 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

Soldatov I.V. developed approaches for harmonization of form № 3-DOZ with statistical form of the Ministry of Healthcare.

Puzyrev V.G. developed approaches for harmonization of form № 3-DOZ with statistical form of the Ministry of Healthcare.

Ryzhov S.A. performed literature review, edited draft version of manuscript.

### Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

### Funding

The study was performed within framework of project "Development and improvement of dose data collection methods for patients undergoing X-ray examinations in the Russian Federation considering the approval of new version of form № 3-DOZ".

### References

1. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1. Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 7-17. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17>.
2. Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Vodovatov AV, Bratilova AA, Tutelyan OE, Biblin AM, et al. Management of data on the exposure of the Russian population for the State report on evaluation of sanitary-epidemiological well-being of the public in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 134-141. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-134-141>.
3. Ryzhov SA, Vodovatov AV, Soldatov IV, Lantukh ZA, Mukhortova AN, Druzhinina YuV, et al. Proposals for Improving the System of Radiation Safety in Medical Exposure. Part 1. Analysis of information contained in state reporting forms and information databases in Moscow. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 92-109. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-92-109>.
4. Onischenko G., Popova AYu, Romanovich IK, Vodovatov AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of x-ray diagnostics and doses from medical exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 6-24. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24>.
5. Rospotrebnadzor. On the state of sanitary-epidemiological wellbeing of public in the Russian Federation in 2020: State report. Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2021. 256 p.
6. Barlovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, et al. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2021: reference book. Saint-Petersburg; 2022. 76 p.
7. Radiation protection № 180 part 1/2. Medical Radiation Exposure of the European Population. European Commission, Luxembourg; 2014. 181 p.
8. Hart D, Hilier MC, Shrimpton PC. Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK – 2010 Review. HPA-CRCE-034., Health Protection Agency; 2012. 87 p.
9. NCRP report 184. Medical radiation exposure of patients in the Unites States. Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements. USA, Bethesda; 2019. 310 p.
10. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly. Scientific Annex A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation. United Nations, New York; May 2022. 344 p.
11. Vodovatov AV. Practical implementation of the diagnostic reference levels concept for the common radiographic examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 47-55. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55>.
12. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Vodovatov AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 6-24. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24>.
13. Druzhinina YuV, Vodovatov AV, Okhrimenko SE. Comparative analysis of effective doses to patients undergoing examination on general-purpose X-ray machines, calculated by various methods. *Gigiya i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2022;101(2): 124-131. (In Russian) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-2-124-131>.
14. Istorik OA, Vodovatov AV, Romanovich IK, Eremina LA, Druzhinina PS, Puzyrev VG. Analysis of the of the population exposure levels of radiation diagnostics in the Leningrad region in 2010-2019. *Meditsina i organizatsiya zdravookhraneniya = Medicine and Healthcare organization*. 2022;7(4): 81-95.
15. Vodovatov AV, Istorik OA, Romanovich IK, Eremina LA, Druzhinina PS, Puzyrev VG. Analysis of the X-ray diagnostic structure and equipment in the Leningrad region in 2010-2019. *Meditsina i organizatsiya zdravookhraneniya = Medicine and Healthcare Organization*. 2021;6(2): 43-64.
16. Druzhinina PS, Istorik OA, Eremina LA, Vodovatov AV, Shatsky IG. Comparison of different approaches for estimating patient effective doses in the Leningrad region. *AIP Conference Proceedings 2250*. 2020: 020009. <https://doi.org/10.1063/5.0013280>.
17. Balonov M, Golikov V, Zvonova I, Chipiga L, Kalnitsky S, Sarycheva S, et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015. *Journal of Radiological Protection*. 38 (121): 121-140. DOI:<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99>.
18. Balonov MI, Golikov VYu, Zvonova IA, Kalnitsky SA, Repin VS, Sarycheva SS, et al. Current levels of medical exposure in Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 67-79. (In Russian).
19. Chipiga LA, Bernhardsson C. Patient doses in Computed Tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169(1-4): 240-244.
20. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly. Scientific Annex A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation. United Nations, New York; May 2022. 344 p.
21. Zvonova IA, Chipiga LA. Trends on medical exposure and radiation protection in nuclear medicine in Russia. Proceedings of International Conference on Radiation Protection in Medicine: Achieving Change in Practice. Vienna, 2017. IAEA, book of contributions. P. 188–192. <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpop-session4.pdf>.
22. Chipiga LA, Zvonova IA, Ryzhkova DV, Menkov MA, Dolgushin MB. Levels of patients exposure and a potential for optimization of the pet diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 31-43. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43>.
23. Chipiga L, Vodovatov A, Zvonova I, Bernhardsson C. Assessment of patient doses and possible approaches for implementation of optimization procedures in PET/CT exam-

inations in the Russian Federation. Proceedings of the 13th international conference on «Medical Physics in the Baltic States» (Kaunas, 9-11 November 2017). 2017. P. 36–40.

24. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. *Annals of the ICRP*. 2021. Vol. 50, No 1. ICRP, Bethesda, 2022.

Received: February 03, 2023

**For correspondence: 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 Well-Being, docent of the Department of General Hygiene, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)

**Larisa A. Chipiga** – Ph.D., 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 Well-Being; research fellow, Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies; docent, Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

**Anzhelika A. Bratilova** – senior researcher, interim head of the Laboratory of internal exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Polina S. Druzhinina** – junior research fellow, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Anastasiya V. Petryakova** – interim junior research fellow, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Svetlana S. Sarycheva** – senior 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

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

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

**Yuliya N. Kapryrina** – the Assistant of the Department of General Hygiene, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

**Ilya V. Soldatov** – Head of Laboratory, State budgetary Institution of Healthcare of the Moscow City «Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health», Moscow, Russia

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

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

**For citation: Vodovатов A.V., Chipiga L.A., Bratilova A.A., Druzhinina P.S., Shatskiy I.G., Petryakova A.V., Sarycheva S.S., Biblin A.M., Akhmatdinov R.R., Kapryrina Yu.V., Soldatov I.V., Puzyrev V.G., Ryzhov S.A. Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ “Data on patient doses from medical X-ray examinations”. Perquisites for the update. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2, P. 126-136. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-126-136**

## Воспоминания о первых годах работы в Ленинградском научно-исследовательском институте радиационной гигиены

Г.В. Архангельская

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

Я поступила на работу в Ленинградский научно-исследовательский институт радиационной гигиены – Лен НИИ радиационной гигиены, далее Институт (сейчас ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) в декабре 1957 г. после окончания аспирантуры на кафедре гигиены труда 1-го Московского ордена Ленина медицинского института – 1-й МОЛМИ (сейчас Первый Московский Государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова). В это время директором Института был академик Н.Ф. Галанин, который позволил мне самой выбрать лабораторию, где я хотела бы работать. Он посоветовал начать знакомство с лабораторией внешнего облучения. Заведующий лабораторией – к.м.н. Ю.К. Кудрицкий встретил меня неприветливо, сказав, что в его лаборатории я буду «... всю жизнь считать потомство у облученных мышей». Такая перспектива научной деятельности меня не увлекла, и я предпочла лабораторию радиационной защиты. Лаборатория находилась не в самом здании Института, а располагалась в 3 комнатах арендованного полуподвального помещения на ул. Верейского. В состав лаборатории входили: заведующий врач-клиницист, рентгенолог С.В. Гречишкин (работал в Институте на 0,5 ставки) и 3 сотрудника: инженер-физик Олег Ложкин (работал в Институте на 0,5 ставки, т.к. работал в Радиовом институте АН СССР – РИАН), м.н.с. Евгений Тучкевич (молодой специалист-гигиенист) и лаборант Лев Штепер. Тема, которой занималась в то время лаборатория, была связана с изучением физических методов дезактивации различных поверхностей, загрязненных радиоактивными веществами (РВ). Меня данная тема заинтересовала, но заниматься этим пришлось недолго. Уже летом 1958 г. вместе с группой сотрудников Института я была направлена в командировку на Урал на работы по изучению радиационной ситуации на Южно-Уральском радиационном следе (ЮУРС). Он образовался в результате аварии – теплового взрыва контейнеров с радиоактивными отходами в хранилище на территории ПО «Маяк», располагавшегося в закрытом городе Челябинск-40 (ныне Озёрск) на реке Тече. Предприятие «Маяк» занималось обогащением урана для создания стержней, погружаемых в реакторы атомных электростанций (АЭС) и научных лабораторий.

Наша группа молодых специалистов под руководством к.м.н. Наталии Андреевны Запольской (в Институте руководила лабораторией метаболизма РВ в организме животных) базировалась в лаборатории радиационной гигиены санитарно-эпидемиологической станции (СЭС)

г. Каменска-Уральского. Ежедневно мы выезжали с целью отбора проб в загрязненных районах (попавших в ЮУРС) на военных автомобилях ГАЗ-69 (которые в народе называли «козлами») (рис. 1). С собой у нас были лопаты и пластиковые пакеты. Нашу группу высаживали в определенных местах, обозначая для работы каждого специалиста границы участка, леса, поля и населенных пунктов (деревень, дачных поселков); устанавливали время и место встречи для обратной поездки на базу.



Рис. 1. Установка объявления об опасности территорий ЮУРСа, загрязненных радионуклидами вследствие радиационной аварии на химкомбинате «Маяк». На фотографии сотрудник физической лаборатории, инженер-физик Л.Р. Романов (справа), 1957 г.

Из всей работы в течение месяца наиболее запомнился забавный эпизод – встреча лицом к лицу под каким-то кустом, где лежала лепешка коровьего навоза, пробу которого я собралась брать, с сотрудником НИИ биофизики (из Москвы) Ю.И. Москалевым (впоследствии профессором, известным ученым в области радиационной гигиены). Наши интересы сошлись – он тоже нацелился взять эту же пробу. В дальнейшем эта забавная встреча послужила основой научных связей с ним и его женой – д.м.н. В.Н. Стрельцовой, сотрудниками НИИ биофизики МЗ СССР. В 1959 г. в г. Челябинске был организован филиал Института биофизики, который в дальнейшем стал Уральским научно-практическим центром радиационной медицины.

После завершения работ на Урале я была направлена на Дальний Восток в рамках начатых в то время

в Институте исследований высоких уровней радиоактивности в пищевой цепочке населения Крайнего Севера («северная цепочка»). Мы изучали степень радиоактивного загрязнения искусственными (цезий-137 и стронций-90) и естественными (свинец-210 и полоний-210) радионуклидами объектов окружающей среды и биопроб: почв, растительности (в особенности ягеля – основного корма северных оленей), мяса северных оленей – основного продукта питания для жителей Крайнего Севера и экскрементов оленей и оленеводов.

Вместе с инженером-физиком О. Ложкиным мы прибыли в город Хабаровск, затем – в город Владивосток, где из радиационно-гигиенической лаборатории областной СЭС нам дали в помощь лаборантку и обеспечили дозиметрическими и радиометрическими приборами. В таком составе наша группа вылетела на о. Сахалин. Из аэропорта г. Южно-Сахалинска мы сначала на «ГАЗике», а затем на телеге отправились в центральную часть острова, на границу тундры и тайги, где проживали оленеводы и олени (рис. 2).



**Рис. 2.** Дорога к стоянке оленеводов на острове Сахалин. На фотографии справа сотрудник лаборатории защиты Архангельская Г.В., 1959 г.

После телеги пришлось пересечь верхом на лошадей, хотя мы трое не умели обращаться с ними. Меня усадили в седло коня по кличке Жан, звучавшей очень экзотично в гуще сахалинской тайги. Я сидела позади хозяина коня, крепко вцепившись в его одежду. Через несколько километров хозяин слез с коня, а мне велел крепко держать поводья и бить коня ногами в бока (до стремян я не доставала), чтобы конь не шел рысью – его любимым шагом. «Если не последуешь совету, будешь как гоголь-моголь, надо только галопом – это переносится седоком легче», – пообещал мне хозяин. Я не знаю, сколько времени мы скакали: в голове у меня от этого галопа были не мозги, а каша, но еще засветло (был сентябрь, ранние сумерки в этом районе) мы доехали до стоянки оленеводов, где стояли уже развернутые чумы (рис. 3). В одном из этих чумов мы должны были ночевать вместе с хозяевами.

Ночью мы, двое ленинградцев и лаборантка из города Владивостока, легли в одном чуме на оленьих шкурах вокруг очага. Очаг был расположен в центре чума, от очага строго вверх шла труба вверх и выходила наружу. Утром мы набрали пробы всех видов и отправились к реке, по которой мы должны были прибыть в ближайший населенный пункт. Далее наш путь был в г. Оху (север о. Сахалина, промышленный центр) и оттуда самолетом – на полуостров Камчатка.



**Рис. 3.** Экспедиция по Дальнему Востоку. Стоянка оленеводов, 1959 г.

Однако в лодке, в которой мы должны были добираться до ближайшего населенного пункта, нашлось место только для приборов. Хозяин лодки вез своего больного ребенка к врачу, при этом лодку против течения помогали тянуть, как бурлаки, четыре собаки. Они бежали по мокрому песку – границе песка и воды. Вожак – очень умный, понимал и выполнял указания своего хозяина в лодке – по его сигналу обегал попадавшие на его пути валуны справа или слева – согласно сигналу, и при этом командовал (кусал!) остальными пристяжными, чтобы те бежали правильно и не запутывали постромки. Мы втроем бежали за собаками. Так и прибежали в населенный пункт, откуда нас отправили в г. Оху (рис. 4).



**Рис. 4.** Ожидание отправления в г. Оху. Остров Сахалин, 1959 г.

Из аэропорта г. Охи мы улетели в Петропавловск-Камчатский, который очень живописно раскинулся на сопках берега залива Золотой Рог.

В Петропавловске-Камчатском нам не пришлось самим отбирать пробы – все уже было сделано и упаковано работниками городской СЭС для дальнейшей транспортировки в Институт. Нам провели небольшую экскурсию по Долине гейзеров, и далее мы полетели в город Магадан для отбора проб в его окрестностях. Магадан запомнился ранними сумерками, деревянными тротуарами и тяжелыми ночами в гостинице. Только я легла в постель и приготовилась уснуть, как почувствовала, что по мне кто-то бегаёт легкими лапками. Зажгла свет – мыш, наглая, насколько не боится меня, в отличие от меня, которая боит-

ся ее. Я сползла с кровати, выбежала в коридор, к дежурной по этажу. На мой страх и вопрос о кошке, дежурная ответила, что кошка у них одна и на нее записываются в очередь за много дней. Пришлось продремать ночь на маленьком диванчике в коридоре возле дежурной. Утром дежурная посоветовала купить красный перец – порошок и рассыпать его вокруг кровати.

Мы с Олегом Владимировичем Ложкиным решили провести эксперимент – купили десяток пакетиков красного перца и рассыпали их вокруг моей кровати. Эту ночь мне снова пришлось провести возле поста дежурной в коридоре, так как мыши, не побоявшись рассыпанного перца, опять бегали по мне. Очевидно, попались мыши, устойчивые (или даже любители) к красному перцу. Счастье, что мы улетали в этот день в обратный путь домой – из Магадана через Южно-Сахалинск в Хабаровск и оттуда уже – в Ленинград. Зачем надо было лететь опять в Южно-Сахалинск, мы не понимали, но иного пути не было.

По пути из Южно-Сахалинска в Хабаровск наш самолет попал в страшную бурю, из-за которой пришлось вернуться опять в Южно-Сахалинск и ждать подходящей погоды. Летчики отправились по домам, а мы, пассажиры, остались в аэропорту – небольшом деревянном сарае (рис. 5).



**Рис. 5.** Ожидание летной погоды в аэропорту Южно-Сахалинска, 1959 г.

Нашей троице места достались под деревянной лестницей, по которой все время бегал народ. Через некоторое время (10–12 ч после нашего прилета) объявили, что погода улучшилась и самолет может лететь в Хабаровск. Работники аэропорта на автомашине собрали экипаж нашего самолета, кликнули пассажиров. Через час после сообщения о возможности вылета из Южно-Сахалинска наш самолет отправился в Хабаровск и благополучно долетел до него. К нашему счастью, самолет на Москву (на Ленинград не было прямого рейса из Хабаровска) улетал через 2 ч. Билеты у нас оказались годными для этого рейса. В Москве мы переехали в другой аэропорт и благополучно улетели в Ленинград. Надо отметить, что дорога из Ленинграда в Южно-Сахалинск и обратно заняла почти целую неделю. В настоящее время этот путь занимает намного меньше времени!

Следует отметить, что начатые в 1950-е гг. уникальные исследования «северной цепочки» под руководством профессора П.В. Рамзаева и М.Н. Троицкой продолжались на протяжении нескольких лет. Сотни тысяч километров по всему советскому побережью Ледовитого океана было пройдено специалистами нашего Института. На базе собранного и исследованного материала выросло много замечательных специалистов – М.Н. Троицкая защитила докторскую диссертацию и несколько сотрудников – кандидатские диссертации. Полученные результаты позволили открыть важнейшие закономерности накопления и миграции искусственных (цезий-137 и стронций-90) и естественных (свинец-210 и полоний-210) радионуклидов по цепочке «лишайник – северный олень – человек». Впервые было показано значение комплекса экологических особенностей Крайнего Севера для высокого уровня накопления цезия-137 в «северной цепочке», что позволило разработать прогноз радиационной обстановки в этих районах и сформулировать рекомендации.

### Благодарность

Автор выражает свою благодарность сотрудникам лаборатории экологии ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева С.А. Зеленцовой и К.В. Варфоломеевой за помощь в оформлении окончательной версии статьи.

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