

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 13 № 4, 2020



**Научно-практический  
журнал**

**УЧРЕДИТЕЛЬ:**  
Федеральное бюджетное  
учреждение науки  
«Санкт-Петербургский  
научно-исследовательский  
институт радиационной гигиены  
имени профессора П.В. Рамзаева»

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 200 экз.



Индекс для подписки в агентстве  
«Роспечать» – 57988

© «Радиационная гигиена», 2020

# РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

## RADIATIONNAYA GYGIENA

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

Главный редактор  
**И.К. Романович**



Том 13 № 4, 2020

## 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)

**Горбанев Сергей Анатольевич** — ФБУН «Северо-западный научный центр гигиены и общественного здоровья», д.м.н. (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)

**Кашпаров Валерий Александрович** — Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии, д.б.н. (Киев, Украина)

**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)

**Надареишвили Давид Киазович** — Центр экспериментальной биомедицины им. И. Бериташвили, PhD (Тбилиси, Грузия)

**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)

**Балонов Михаил Исаакович** — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.м.н., профессор (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)

**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 (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)

**Константинов Юрий Олегович** — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», к.т.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

**FOUNDER:**  
Federal Scientific Organization  
«Saint-Petersburg Research Institute  
of Radiation Hygiene  
after Professor P.V. Ramzaev»

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. 13 № 4, 2020

# RADIATION HYGIENE

---

Vol. 13 № 4, 2020

## 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)

**Sergey A. Gorbanev** – Northwest Public Health Research Center (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

**Valeriy A. Kashparov** – Ukrainian Scientific Research Institute of Agricultural Radiology, Doctor of Biology (Kiev, Ukraine)

**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)

**David K. Nadareshvili** – Center of Experimental Biomedicine after I. Beritashvili, PhD (Tbilisi, Georgia)

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

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

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

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

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

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

## Editorial Board

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

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

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

**Genrietta V. Arkhangel'skaya** – Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, M.D. (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Mikhail I. Balonov** – Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Doctor of Biology, Professor (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. Vodovotov** – Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, PhD (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 (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)

**Yuriy O. Konstantinov** – Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Candidate of Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 13 № 4, 2020

### НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Чипига Л.А., Петрова А.Е., Водоватов А.В., Станжевский А.А., Лумпов А.А., Лаврешов Д.Д., Наурузбаева Л.Е., Кушнаренко С.М., Мосунов А.А.

**Определение органных доз внутреннего облучения пациентов при радионуклидной терапии  $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом ..... 6**

Шалагинов С.А., Аклевев А.В.

**Подходы к оценке полноты и качества регистров потомков облучённого населения..... 17**

Власов О.К., Звонова И.А., Краевский П., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А.

**Реконструкция параметров радиоэкологической модели по результатам мониторинга радиационной обстановки в Мазовии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Варшавского» сценария проекта МАГАТЭ EMRAS) ..... 26**

Панфилова В.В., Колганова О.И., Чибисова О.Ф., Жаворонков Л.П.

**Специфика формирования родительских групп животных при определении влияния малых доз радиации на когнитивные функции потомства..... 34**

### ОБЗОРЫ

Павлов А.Н., Чиж Т.В., Снегирев А.С., Санжарова Н.И., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю., Ипатова В.С., Дорн Ю.А.

**Технологический процесс радиационной обработки пищевой продукции и дозиметрическое обеспечение..... 40**

Омельчук В.В.

**Радиационно-гигиеническая характеристика глобальных выпадений радионуклидов в арктических регионах России (по данным НИИ радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева)..... 51**

### САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Симонова В.Г., Бубликова Л.И.

**Ретроспективный анализ радиационной обстановки на территории Орловской области ..... 67**

### РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Репин В.С.

**Исследование возможности использования искусственной нейронной сети для распознавания и оценки вклада отдельных радионуклидов в суммарный бета-спектр ..... 74**

Киселев С.М., Маренный А.М., Старинский В.Г., Бельских Ю.С., Шлыгин В.В., Коренков И.П., Неведов Н.А., Маренный М.А.

**Оценка качества измерений объемной активности радона в воздухе помещений. Результаты международных сравнительных испытаний ..... 82**

Арефьева Д.В., Фирсанов В.Б., Куруч Д.Д., Брюхов Р.Е., Тарита В.А.

**Градуировка сцинтилляционного спектрометра гамма-излучений с применением метода математического моделирования ..... 93**

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Рамзаев В.П., Бернхардссон К., Дворник А.А., Бакарикова Ж.В., Карлберг О., Водоватов А.В., Йонссон М., Некрасов В.А.

**Результаты международных сравнительных испытаний по определению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы ..... 101**

### ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р., Библин А.М., Братилова А.А., Журавлева В.Е., Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., Сивенков А.Г., Тутельян О.Е., Цовьянов А.Г.

**Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2019 г. .... 110**

**ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ ЗА 2020 ГОД..... 120**

### ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

**«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» ..... 124**

## CONTENTS

Vol. 13 № 4, 2020

### RESEARCH ARTICLES

Chipiga L.A., Petrova A.E., Vodovatov A.V., Stanzhevsky A.A., Lumpov A.A., Lavreshov D.D., Naurzbaeva L.E., Kushnarenko S.M., Mosunov A.A.

**Patient organ and effective dose estimation in radionuclide therapy with  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride ..... 14**

Shalaginov S.A., Akleyev A.V.

**Approaches to the assessment of completeness and quality of the registry of exposed population offspring..... 24**

Vlasov O.K., Zvonova I.A., Krajewski P., Schukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A.

**Reconstruction of radio-ecological model parameters based on the results of monitoring the radiation situation in Mazovia after the Chernobyl accident (based on the «Warsaw» scenario of the IAEA EMRAS project) .. 32**

Panfilova V.V., Kolganova O.I., Chibisova O.F., Zhavoronkov L.P.

**The influence of learning ability of irradiated and intact rats-parents on higher brain function of their offspring... 38**

### REVIEWS

Pavlov A.N., Chizh T.V., Snegirev A.S., Sanzharova N.I., Chernyaev A.P., Borshegovskaya P.Yu., Ipatova V.S., Dorn Yu.A.

**Technological process of food irradiation and dosimetric support ..... 49**

Omelchuk V.V.

**Radiation-hygienic characteristic of the global radionuclide fallout in the arctic regions of Russia (based on the data of the Institute of Radiation Hygiene after professor P.V. Ramzaev) ..... 64**

### SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Simonova V.G., Bublikova L.I.

**Retrospective analysis of the radiation situation in the territory of the Oryol region..... 72**

### RADIATION MEASUREMENTS

Repin V.S.

**Study of the possibility of using an artificial neural network to recognize and assess the contribution of individual radionuclides to the total beta spectrum ..... 80**

Kiselev S.M., Marennyy A.M., Starinskiy V.G., Belskikh Yu.S., Shlygin V.V., Korenkov I.P., Nefedov N.A., Marennyy M.A.

**Quality assessment of indoor radon measurements. Results of the international radon in-field intercomparison study..... 91**

Arefyeva D.V., Firsanov V.B., Kuruch D.D., Bryukhov R.E., Tarita V.A.

**Gamma scintillation spectrometer calibration using the method of mathematical modeling ..... 100**

### BRIEF MESSAGES

Ramzaev V.P., Bernhardsson Ch., Dvornik A.A., Bakarikova Zh.V., Karlberg O., Vodovatov A.V., Jonsson M., Nekrasov V.A.

**Results of international comparison tests on determination of  $^{137}\text{Cs}$  activity concentration in soil samples ..... 101**

### ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENE PASSPORTIZATION

Barkovsky A.N., Akhmatdinov Ruslan R., Akhmatdinov Rustam R., Biblin A.M., Bratilova A.A., Zhuravleva V.E., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Sivenkov A.G., Tutelyan O.E., Tsovyanov A.G.

**The outcomes of functioning of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens based on the 2019 data ..... 118**

**LIST OF ARTICLES FOR 2020..... 120**

### JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

**INSTRUCTIONS FOR AUTHORS..... 124**

## Определение органных доз внутреннего облучения пациентов при радионуклидной терапии $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом

Л.А. Чипига<sup>1,2,3</sup>, А.Е. Петрова<sup>4</sup>, А.В. Водоватов<sup>1,5</sup>, А.А. Станжевский<sup>2</sup>, А.А. Лумпов<sup>6</sup>,  
Д.Д. Лаврешов<sup>4</sup>, Л.Е. Наурзбаева<sup>4</sup>, С.М. Кушнарченко<sup>4</sup>, А.А. Мосунов<sup>4</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 им. академика А.М. Гранова, Санкт-Петербург, Россия

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

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>6</sup> Акционерное общество «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия

*Для лечения костных метастазов и улучшения качества жизни пациентов с метастатическим кастрационно-резистентным раком предстательной железы применяют радионуклидную терапию с  $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом. Однако в настоящий момент отсутствуют достоверные данные по биораспределению  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида в организме пациентов. Целью данной работы являлась оценка поглощенных и эквивалентных доз в радиочувствительных органах и тканях от внутреннего облучения для пациентов с метастатическим кастрационно-резистентным раком предстательной железы при терапии  $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом. Дозы внутреннего облучения от  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида были рассчитаны для камерной модели пациентов с метастатическим кастрационно-резистентным раком предстательной железы. Данная модель состоит из 8 камер (плазма крови, две камеры, описывающие костную ткань, тонкий кишечник, верхний отдел толстого кишечника, нижний отдел толстого кишечника, кал и остальная часть тела). С использованием программного обеспечения SAAM II v2.3. были рассчитаны интегрированные по времени активности. Для расчета поглощенных доз использовали программное обеспечение IDAC-Dose 2.1. Самые высокие поглощенные дозы в органах и эквивалентные дозы определены для поверхности кости и красного костного мозга. Поглощенная доза от  $\alpha$ -излучения в поверхности кости за серию из шести терапевтических процедур с введением  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорид составляет 1 Гр; в красном костном мозге – 0,14 Гр. Однако использованный подход не учитывает специфического накопления радиофармпрепарата в метастазах, что может приводить к значительной переоценке поглощенной дозы в здоровой части поверхности кости и красного костного мозга.*

**Ключевые слова:** радионуклидная терапия,  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорид, рак предстательной железы, радиофармпрепараты, доза внутреннего облучения, поглощенные дозы в органах, эквивалентная доза.

### Введение

Рак предстательной железы является наиболее часто встречающимся онкологическим заболеванием мочеполовой системы у мужчин [1]. В настоящее время, несмотря на наличие нескольких вариантов лечения метастатического кастрационно-резистентного рака предстательной железы (мКРРПЖ), увеличивающих продолжительность жизни, у большинства таких пациентов ухудшается качество жизни, разви-

вается инвалидизация, что в конечном итоге приводит к летальному исходу от этого заболевания [2]. В 90% случаев мКРРПЖ сопровождается возникновением метастазов в костной ткани, что может приводить к развитию выраженного болевого синдрома, патологическому перелому костей скелета, угрожающей жизни гиперкальциемии, сдавлению спинного мозга и другим синдромам, связанным со сдавлением нервов [2]. Медианная продолжительность жизни у пациентов

**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

с мКРРПЖ составляет менее 3 лет; в случае неэффективности терапии – менее 1 года.

Для лечения костных метастазов и паллиативной терапии используют терапевтические радиофармпрепараты (РФП), меченные  $\beta$ -излучающими радионуклидами [3]. Наиболее выгодными характеристиками обладают  $\alpha$ -излучающие радионуклиды, так как высокая поглощенная доза в красном костном мозге ограничивает использование  $\beta$ -излучающих радионуклидов в терапии. Перспективным является использование  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида – остеотропного  $\alpha$ -излучателя, оказывающего выраженный и локализованный цитостатический эффект на метастатические раковые клетки. Короткий пробег  $\alpha$ -частиц минимизирует воздействие на соседние здоровые ткани, в частности, на красный костный мозг [2].

Для радиационной защиты пациентов при планировании курса радионуклидной терапии с использованием  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида необходимо разработать методы оценки поглощенных доз в органе-мишени и в остальных радиочувствительных органах и тканях. Для этого необходимо разработать методику оценки поглощенных доз на основании моделей биораспределения РФП в организме пациентов, что особенно актуально на этапе клинических испытаний, когда экспериментальные данные по пациентам отсутствуют.

На сегодняшний день существует несколько моделей биораспределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида, как для здоровых лиц, так и для пациентов с мКРРПЖ [3, 4, 6–8]. Как правило, для оценки поглощенных доз использовали модели для здоровых пациентов [5], что связано с недостатком экспериментальных данных. Такой подход не учитывает специфику накопления радиофармпрепарата (РФП) в очагах и его выведения. В предыдущей работе был выполнен сравнительный анализ моделей и выбрана оптимальная модель, учитывающая специфику пациентов с мКРРПЖ [3].

**Цель исследования** – оценка поглощенных доз в радиочувствительных органах и тканях от внутреннего облучения для пациентов с мКРРПЖ при терапии  $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом, в рамках которой были определены:

- интегрированные по времени активности в камерах модели биораспределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида у пациентов с мКРРПЖ;
- поглощенные дозы в радиочувствительных органах и тканях;
- эквивалентные дозы.

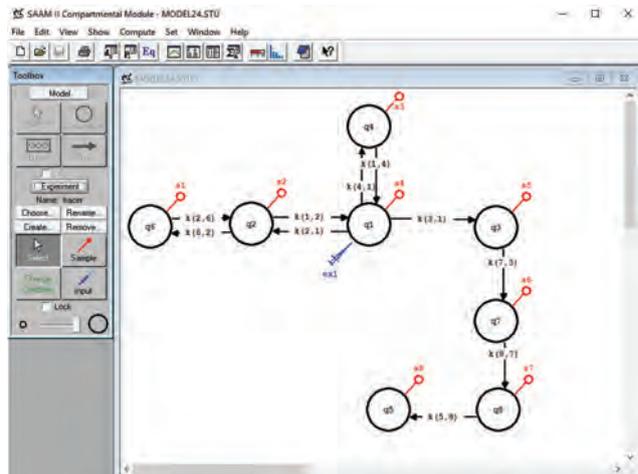
### Материалы и методы

#### Построение камерной модели и определения интегрированных по времени активностей в камерах

Для оценки эквивалентных доз в работе использовали модель распределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида для пациентов с мКРРПЖ, которая была предложена Taprogge et al. [4] и детально описана в предыдущей работе [3]. Модель включает в себя центральную камеру – плазму крови, подмодели костной ткани и подмодели желудочно-кишечного тракта с выведением  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида с калом; остальная часть тела представлена в виде камеры для моделирования других органов и тканей, не включенных в модель [3, 4]. Костная ткань представлена двумя каме-

рами [3], при этом первая камера (костная ткань 1) соответствовала костной ткани с быстрым обменом веществ, вторая камера (костная ткань 2) – костной ткани с медленным обменом веществ [4].

Для решения камерной модели биораспределения РФП у пациентов с мКРРПЖ было использовано специализированное программное обеспечение SAAM II v2.3 (рис. 1), которое применяют для решения систем дифференциальных уравнений [9].



**Рис. 1.** Интерфейс программного обеспечения SAAM II v2.3 с моделью биораспределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида для пациентов с мКРРПЖ. Красным отмечены измеренные активности данной камеры, синим – камера, в которую вводили РФП, черным – камеры модели. Кругами отмечены камеры:  $q_1$  – плазма крови;  $q_2$  – костная ткань 1;  $q_6$  – костная ткань 2;  $q_4$  – остальная часть тела;  $q_3$  – тонкий кишечник;  $q_7$  – верхний отдел толстого кишечника;  $q_8$  – нижний отдел толстого кишечника;  $q_5$  – кал

**[Fig. 1.]** Interface of SAAM II v2.3 software with  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride biodistribution model of mCRPC patients. The activities of the compartments are marked with red; the compartment with radiopharmaceutical injection marked with blue; the model compartments are marked with black. The model consists of next compartments:  $q_1$  – blood;  $q_2$  – bone 1;  $q_6$  – bone 2;  $q_4$  – rest of the body;  $q_3$  – small intestine;  $q_7$  – upper large intestine;  $q_8$  – lower large intestine;  $q_5$  – faeces]

При построении модели биораспределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида для пациентов с мКРРПЖ в программном обеспечении SAAM II v2.3 был использован кинетический тип модели. При задании параметров введения указали, что РФП вводят болюсно в плазму крови. Решение системы дифференциальных уравнений провели численным методом Розенброка с изначально заданной точностью 0,001. При дальнейшем анализе приняли, что единица введенного вещества соответствует 1 МБк  $^{223}\text{Ra}$ . Оценку накопления  $^{223}\text{Ra}$  в камерах модели проводили для периода 33 месяца от момента введения  $^{223}\text{Ra}$  в организм (максимальный период дожития пациентов с мКРРПЖ после радионуклидной терапии с  $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом [2]): каждый час в первые сутки, каждые 10 ч с первых суток по десять дней и потом ежемесячно до 33 месяцев.

Интегрированные по времени нахождения радионуклида  $^{223}\text{Ra}$  активности во всех камерах модели рассчитывали на основании полученных кривых накопления и выве-

дения в программе Origin Pro 2020 (OriginLab Corporation, Northhampton, MA, USA [10]) в течение 33 месяцев, учитывая биологическое выведение  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида из организма и физический распад  $^{223}\text{Ra}$  и его дочерних радионуклидов (табл. 1). В связи с короткими периодами полураспада при расчетах допустили, что дочерние радионуклиды распределяются в организме так же, как и  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорид. Интегрированные по времени активности в каждой камере определяли отдельно для каждого дочернего радионуклида в цепочке распада  $^{223}\text{Ra}$ . Для камеры «Кал» интегрированную по времени активность определяли с учетом опорожнения прямой кишки каждые сутки, т.е. раз в сутки обнуляя накопленную в этой камере активность и начиная ее накопление с нуля.

*Определение поглощенных доз в органах и тканях*

Для расчета поглощенных доз в органах и тканях на основе биокинетических данных была использована программа IDAC-Dose2.1 [11].

Данное программное обеспечение позволяет рассчитывать поглощенные дозы в органах и тканях для 1252 радионуклидов из Публикации 107 МКРЗ [12]. Для расчета доз в IDAC-Dose2.1 используется семейство из 7 математических фантомов MIRD [14], представляющих взрослых мужчину и женщину, и 5 возрастных групп детей. В данной работе оценку доз проводили для фантома взрослого мужчины.

При расчете доз в программе IDAC-Dose2.1 интегрированные по времени активности для 8 камер модели использовали как накопленные активности в органах-источниках. При этом были сделаны следующие допущения:

- кровь соответствовала в расчетах камере «плазма крови»;
- тонкий кишечник соответствовал камере «тонкий кишечник»;

- восходящий отдел толстого кишечника соответствовал камере «верхний отдел толстого кишечника»;
- нисходящий отдел толстого кишечника соответствовал камере «нижний отдел толстого кишечника»;
- прямая кишка соответствовала камере «кал»;
- накопленные активности красным костным мозгом трабекулярной и кортикальной кости соответствовали по половине интегрированной по времени активности в камере «костная ткань 1»;
- накопленные активности в поверхности трабекулярной и кортикальной кости соответствовали по четверти интегрированной по времени активности в камере «костная ткань 2»;
- накопленные активности в объеме трабекулярной и кортикальной кости соответствовали по четверти интегрированной по времени активности в камере «костная ткань 2»;
- другие органы и межклеточные жидкости соответствовали в расчетах камере «остальная часть тела».

Дозы в радиочувствительных органах и тканях определяли как сумму доз от каждого радионуклида в цепочке.

*Оценка эквивалентных доз*

Эквивалентные дозы определяли на основании поглощенных доз в радиочувствительных органах с использованием двух взвешивающих коэффициентов 5 и 20 для  $\alpha$ -излучения и 1 для  $\beta/\gamma$ -излучения. Взвешивающий коэффициент  $\omega_r=5$  для  $\alpha$ -излучения был выбран для оценки детерминированных эффектов, связанных с относительной биологической эффективностью (ОБЭ)  $\alpha$ -частиц [15–17]. Дополнительно эквивалентные дозы оценивали с использованием взвешивающего коэффициента  $\alpha$ -излучения  $\omega_r=20$ , согласно Публикациям МКРЗ 60 и 103 [18, 19] и НРБ 99/2009<sup>1</sup>.

Поглощенные дозы в радиочувствительных органах и эквивалентные дозы определяли на единицу вводимой

Продукты распада  $^{223}\text{Ra}$  с видами распада и энергиями на ядерное превращение (nt) [12, 13]

Таблица 1

[Table 1

The daughter radionuclides in the decay chain of  $^{223}\text{Ra}$ , decay types and energies for nuclear transformation (nt) [12, 13]

Нуклид [Radionuclide]	Период полураспада [Half-life]	Вид распада [Decay type]	Энергия излучения, МэВ nt <sup>-1</sup> [Radiation energy, MeV nt <sup>-1</sup> ]			
			Альфа [Alpha]	Электрон [Electron]	Фотон [Photon]	Общая [Total]
$^{223}\text{Ra}$	11,4 сут [day]	Альфа [Alpha]	5,8	0,08	0,14	6,0
$^{219}\text{Rn}$	3,96 с [sec]	Альфа [Alpha]	6,9	<0,01	0,058	6,9
$^{215}\text{Po}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$ с [sec]	Альфа [Alpha]	7,5	<0,01	<0,01	7,5
$^{211}\text{Pb}$	36,1 мин [min]	Бета [Beta]	–	0,45	0,06	0,51
$^{211}\text{Bi}$	2,14 мин [min]	Альфа/Бета [Alpha/ Beta]	6,7	0,01	0,05	6,7
$^{207}\text{Tl}(0,997)$	4,77 мин [min]	Бета [Beta]	–	0,49	<0,01	0,49
$^{211}\text{Po}(0,003)$	0,516 с [sec]	Альфа [Alpha]	7,6	<0,01	<0,01	7,6
$^{207}\text{Pb}$				Стабильный [Stable]		

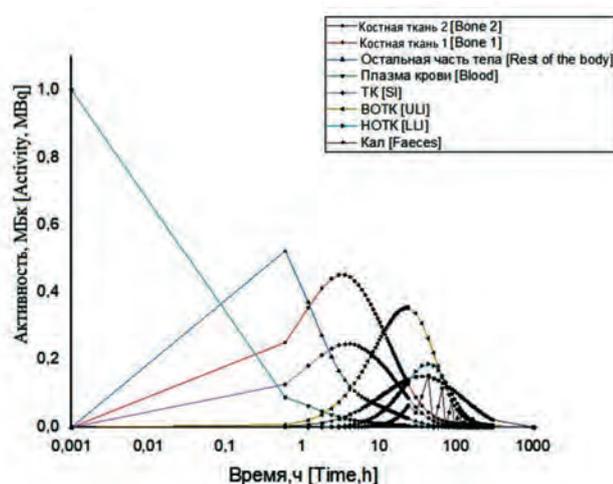
<sup>1</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/2009): Санитарные правила и нормы (СанПиН 2.6.1.2523-09): утв. и введ. в действие от 01 сентября 2009 г. взамен СанПиН 2.6.1.758-99. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009. 100 с. [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 “Radiation Safety Standard NRB-99/2009” (In Russ.)]

активности (1 МБк). Дополнительно эквивалентные дозы определяли за процедуру (3,5 МБк для пациента 70 кг) и курс из 6 процедур (21 МБк) [20]. В работе Chittenden et al. [21] показали, что дозы в основных радиочувствительных органах от первого и последующих введений <sup>223</sup>Ra-дихлорида во время одного курса лечения не отличаются, поэтому дозу за курс из шести процедур определяли умножением дозы за одну процедуру на 6.

### Результаты и обсуждение

#### Интегрированные активности в органах

Кривые накопления и выведения <sup>223</sup>Ra-дихлорида для всех камер модели, полученные с использованием программного обеспечения SAAM II v2.3, представлены на рисунке 2. Интегрированные по времени активности для всех камер модели, полученные для единицы активности <sup>223</sup>Ra (1 МБк) с использованием программного обеспечения Origin Pro 2020, представлены в таблице 2.



**Рис. 2.** Накопление и выведение <sup>223</sup>Ra-дихлорида в камерах при внутривенном введении единицы активности (1 МБк): ТК – тонкий кишечник, БОТК – верхний отдел толстого кишечника, НОТК – нижний отдел толстого кишечника

**[Fig. 2.** Accumulation and excretion of <sup>223</sup>Ra-dichloride in the compartments per unit of injected activity (1 MBq) without the decay of the <sup>223</sup>Ra consideration. SI – small intestine; ULI – upper large intestine; LLI – lower large intestine]

#### Поглощенные дозы в органах и тканях

Полученные с использованием программного обеспечения IDAC-Dose2.1 поглощенные дозы в органах и тканях и эквивалентные дозы на единицу вводимой активности (1 МБк) за терапевтическую процедуру (3,5 МБк) и курс лечения из 6 процедур (21 МБк) представлены в таблице 3.

Самые высокие поглощенные дозы в органах и эквивалентные дозы определены для поверхности кости и красного костного мозга. Поглощенная доза в поверхности кости от α-излучения за серию из 6 терапевтических процедур с введением <sup>223</sup>Ra-дихлорид для человека весом 70 кг (21 МБк) составляет примерно 1 Гр [20]. Соответствующая поглощенная доза в красном костном мозге составляет 0,14 Гр, что соответствует усредненной дозе по всему объему красного костного мозга. При этом не учитывается, что модель биораспределения <sup>223</sup>Ra-дихлорида прогнозирует неравномерное распределение поглощенных доз в костной ткани с более высокими дозами вблизи поверхности кости. Более детально этот вопрос разобран в работе Hobbs et al. [22], где авторы провели симуляцию с использованием метода Монте-Карло для оценки дозы на клеточном уровне. Авторы пришли к выводу, что распределение дозы приводит к существенному увеличению дозы в красном костном мозге и различных структурах кости. Также крайне неравномерно (до нескольких порядков величины) активность накапливается в метастатических очагах и здоровой костной ткани. Эти особенности должны учитываться при оценке поглощенных доз пациентов, но не могут быть решены с применением имеющейся модели и программного обеспечения.

#### Эквивалентные дозы

Следует обратить внимание, что в работе для оценки эквивалентных доз для α-излучения использовали взвешивающий коэффициентах ω<sub>r</sub>=5. Взвешивающий коэффициент ω<sub>r</sub> = 20, представленный в Публикациях МКРЗ 60 и 103, используется для оценки стохастических эффектов, которые могут возникнуть в органе или ткани после облучения; коэффициент ω<sub>r</sub>=5 соответствует детерминированным эффектам. Коэффициенты ω<sub>r</sub> из Публикаций МКРЗ 60 и 103 для излучения предназначены для оценки стохастических эффектов от низких поглощенных доз.

Таблица 2

**Интегрированные по времени активности для всех камер модели при введении единицы активности (1 МБк)**

[Table 2

**Time-integrated activities for all model compartments with the injection of an unit of activity (1 MBq)]**

Камеры [Cameras]	Интегрированные по времени активности, МБк·ч [Time-integrated activities, MBq · h]						
	<sup>223</sup> Ra	<sup>219</sup> Rn, × 10 <sup>-5</sup>	<sup>215</sup> Po, × 10 <sup>-9</sup>	<sup>211</sup> Pb, × 10 <sup>-2</sup>	<sup>211</sup> Bi, × 10 <sup>-4</sup>	<sup>207</sup> Tl, × 10 <sup>-3</sup>	<sup>211</sup> Po, × 10 <sup>-6</sup>
Плазма крови [Blood]	0,85	0,22	0,99	0,12	0,68	0,15	0,27
Костная ткань 1 [Bone 1]	11	4,6	21	2,5	15	3,3	5,9
Костная ткань 2 [Bone 2]	31	12	56	6,8	40	8,9	16
Остальная часть тела [Rest of the body]	2,9	1,2	5,4	0,62	3,7	0,81	1,5

Камеры [Cameras]	Интегрированные по времени активности, МБк·ч [Time-integrated activities, MBq · h]						
	<sup>223</sup> Ra	<sup>219</sup> Rn, ×10 <sup>-5</sup>	<sup>215</sup> Po, ×10 <sup>-9</sup>	<sup>211</sup> Pb, ×10 <sup>-2</sup>	<sup>211</sup> Bi, ×10 <sup>-4</sup>	<sup>207</sup> Tl, ×10 <sup>-3</sup>	<sup>211</sup> Po, ×10 <sup>-6</sup>
Тонкий кишечник [Small intestine]	6,4	2,6	0,12	1,4	8,3	1,7	3,3
Верхний отдел толстого кишечника [Upper large intestine]	25	9,9	45	5,4	32	7,2	13
Нижний отдел толстого кишечника [Lower large intestine]	18	7,0	32	3,9	23	5,1	9,2
Кал [Faeces]	7,4	–	–	–	–	–	–

Таблица 3

**Поглощенные дозы от α- и β+γ-излучений, эквивалентные дозы с взвешивающим коэффициентом 5 и 20 для α-излучения на единицу вводимой активности (1 МБк) за терапевтическую процедуру (3,5 МБк) и курс лечения из 6 процедур (21 МБк)**  
[Table 3]

**Absorbed doses from α- and β + γ-radiation, equivalent doses with a weighting factor of 5 and 20 for α-radiation per unit of injected activity (1 MBq) for a therapeutic procedure (3,5 MBq) and a course of treatment of 6 procedures (21 MBq)]**

Орган/ткань [Organ/tissue]	Поглощенная доза на ед. активности, мГр/МБк [Absorbed dose per activity unit, mGy / MBq]		Эквивалентные дозы, мЗв [Equivalent doses, mSv]					
			Взвешивающий коэффициент 5 [Weighing factor 5]			Взвешивающий коэффициент 20 [Weighing factor 20]		
	α-излучение [α-emission]	β+γ- излучения [β+γ- emission]	Для 1 МБк [For 1 MBq]	Одна процедура (3,5 МБк) [One pro- cedure (3,5 MBq)]	Курс из 6 процедур (21 МБк) [Course of 6 procedures (21 MBq)]	Для 1 МБк [For 1 MBq]	Одна процедура (3,5 МБк) [One pro- cedure (3,5 MBq)]	Курс из 6 процедур (21 МБк) [Course of 6 procedures (21 MBq)]
Надпочечники [Adrenals]	0,24	0,0032	1,2	4,2	25	4,8	17	102
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,18	0,0025	0,9	3,2	19	3,6	13	78
Головной мозг [Brain]	0,19	0,0032	0,95	3,3	20	3,8	13	78
Молочная железа [Breast]	0,22	0,014	1,1	3,9	23	4,4	15	90
Почки [Kidneys]	0,26	0,0036	1,3	4,6	28	5,2	18	108
Печень [Liver]	0,25	0,0036	1,3	4,6	28	5,0	18	108
Мышцы [Muscle]	0,18	0,0029	0,9	3,2	19	3,6	13	78
Поджелудочная железа [Pancreas]	0,24	0,0039	1,2	4,2	25	4,8	17	102
Красный костный мозг [Red bone marrow]	6,6	0,12	33	116	696	132	462	2772
Яички [Testes]	0,20	0,0027	1,0	3,5	21	4,0	14	84
Щитовидная железа [Thyroid]	0,22	0,003	1,1	3,9	23	4,4	15	90
Поверхность кости [Bone surface]	46	0,41	230	805	4830	920	3220	19320
Желудок [Stomach]	0,25	0,0037	1,3	4,6	28	5,0	18	108

Орган/ткань [Organ/tissue]	Поглощенная доза на ед. активности, мГр/МБк [Absorbed dose per activity unit, mGy / MBq]		Эквивалентные дозы, мЗв [Equivalent doses, mSv]					
			Взвешивающий коэффициент 5 [Weighing factor 5]			Взвешивающий коэффициент 20 [Weighing factor 20]		
	$\alpha$ -излучение [ $\alpha$ -emission]	$\beta+\gamma$ - излучения [ $\beta+\gamma$ - emission]	Для 1 МБк [For 1 MBq]	Одна процедура (3,5 МБк) [One pro- cedure (3,5 MBq)]	Курс из 6 процедур (21 МБк) [Course of 6 procedures (21 MBq)]	Для 1 МБк [For 1 MBq]	Одна процедура (3,5 МБк) [One pro- cedure (3,5 MBq)]	Курс из 6 процедур (21 МБк) [Course of 6 procedures (21 MBq)]
Тонкий кишечник [Small intestine]	0,26	0,027	1,3	4,6	28	5,2	18	108
Кожа [Skin]	0,19	0,0026	0,95	3,3	20	3,8	13	78
Селезенка [Spleen]	0,29	0,004	1,5	5,3	32	5,8	20	120
Тимус [Thymus]	0,19	0,003	0,95	3,3	20	3,8	13	78
Дыхательная система [ET region]	0,17	0,0024	0,85	3,0	18	3,4	12	72
Легкие [Lung]	0,27	0,0041	1,4	4,9	29	5,4	19	114
Толстый кишечник [Colon]	0,26	0,022	1,3	4,6	28	5,2	18	108
Пищевод [Oesophagus]	0,25	0,0036	1,3	4,6	28	5,0	18	108
Слюнные железы [Salivary glands]	0,20	0,0028	1,0	3,5	21	4,0	14	84
Желчный пузырь [Gallbladder]	0,20	0,0040	1,0	3,5	21	4,0	14	84
Лимфатические узлы [Lymphatic nodes]	0,17	0,0032	0,85	3,0	18	3,4	12	72
Слизистая оболочка рта [Oral mucosa]	0,20	0,0034	1,0	3,5	21	4,0	14	84
Простата [Prostate]	0,19	0,0026	0,95	3,3	20	3,8	13	78
Сердце [Heart]	0,22	0,0040	1,1	3,9	23	4,4	15	90

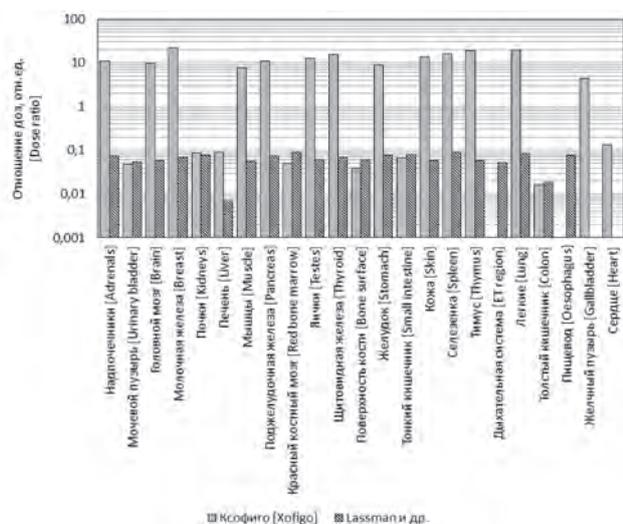
Использование данных коэффициентов для оценки высоких поглощенных доз (более 250 мГр) приведет к значительной переоценке возникновения и тяжести всех тканевых реакций. Для адекватной оценки детерминированных эффектов (тканевых реакций) необходимо нормализовать среднюю поглощенную дозу в органе или ткани с учетом ОБЭ. Значения ОБЭ представлены в Публикации МКРЗ 58 и Публикации МКРЗ 92; в контексте дозиметрии  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида  $\omega_r$  принят равным 5.

*Сравнительная оценка полученных результатов*

В настоящее время существуют опубликованные данные по оценке органных доз внутреннего облучения  $^{223}\text{Ra}$ , основанные на стандартной модели биораспределения  $^{223}\text{Ra}$  в здоровых органах и тканях из Публикации МКРЗ 67 [7]. В работе Lassmann et al. [5] представлены значения эквивалентных доз в основных радиочувствительных

органах при введении пациенту терапевтической дозы  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида (при взвешивающем коэффициенте  $\omega_r=5$  для  $\alpha$ -излучения). Дозы в основных радиочувствительных органах, полученные на основании модели для здоровых людей, оказались существенно выше аналогичных доз (в среднем в 22 раза), полученных с использованием модели для пациентов с МКРРПЖ в настоящей работе (см. табл. 3). Отношение эквивалентных доз, полученных в настоящей работе на основании модели биораспределения для пациентов с МКРРПЖ [4], к дозам по модели для здоровых людей [5] представлено на рисунке 3.

Наибольшие различия зафиксированы для печени (дозы, определенные в настоящем исследовании, для пациентов с МКРРПЖ в 140 раз ниже доз здоровых людей) и толстого кишечника (дозы у пациентов с МКРРПЖ в 55 раз ниже доз здоровых людей), что обусловливается различиями в скоростях перехода  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида между ка-



**Рис. 3.** Отношение эквивалентных доз, полученных в настоящей работе, к дозам из работы Lassmann et al. [5], полученным на основании модели МКРЗ для здорового человека, и к дозам из инструкции к радиофармпрепарату Ксофиго [20, 23]

**[Fig. 3.]** Comparison of equivalent doses estimated in this work with doses in the work of Lassmann et al. [5], estimated based on the ICRP model for a healthy person, and with doses from the Xofigo radiopharmaceutical [20, 23]

мерами в рассмотренных моделях. Например, скорость обмена  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида между плазмой крови и мягкими тканями в среднем в 16 раз ниже в модели здоровых людей по сравнению с моделью для пациентов с мКРРПЖ; скорость выведения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида из плазмы крови в мочевыводящую систему или желудочно-кишечный тракт ниже в 23 раза. Низкие скорости перехода между камерами и выведением приводят к задержанию активности  $^{223}\text{Ra}$  в организме и высоким дозам облучения органов и тканей здоровых людей.

В настоящее время в зарубежной клинической практике используется РФП  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорид с торговым названием Ксофиго для лечения пациентов с мКРРПЖ. В инструкции к РФП приведены поглощенные дозы на 1 МБк от  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения [20, 23]. Для сравнения с эквивалентными дозами, полученными в настоящей работе по модели для пациентов с мКРРПЖ, эквивалентные дозы для РФП Ксофиго были рассчитаны с взвешивающим коэффициентом  $\omega_r = 5$ . Отношение эквивалентных доз, определенных в настоящей работе, к эквивалентным дозам для Ксофиго приведено на рисунке 3.

Для большинства органов эквивалентные дозы по инструкции к Ксофиго ниже по сравнению с полученными в настоящей работе: до 22 раз для молочной железы, до 19 раз в тимусе и легких (см. рис. 3). Для мочевого пузыря, почек, печени, красного костного мозга и тонкого кишечника дозы по инструкции к Ксофиго были выше по сравнению с расчетами из настоящей работы. Можно предположить, что такие различия связаны с тем, что для большинства мягких тканей в инструкции к Ксофиго доза от  $\alpha$ -излучения была приравнена к нулю в связи с низким накоплением РФП. Использование взвешивающего коэффициента  $\omega_r = 5$  для  $\alpha$ -излучения для таких органов увеличивает разницу в эквивалентных дозах с расчетами из настоящей работы, где вклад  $\alpha$ -излучения учиты-

вался при определении дозы. Большие дозы для органов мочевыделительной системы для Ксофиго могут обосновываться учетом выведения препарата в том числе и с мочой, в то время как в модели [3, 4], использованной для расчета доз в настоящей работе, камеры мочевыделительной системы отсутствовали. Однако отсутствие данных о биораспределении и фармакокинетике препарата Ксофиго не дает возможности обоснованно оценить разницу в дозах.

## Заключение

Выполненная работа позволила оценить поглощенные дозы в органах и тканях пациентов с мКРРПЖ для курса терапии  $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом с использованием специфической модели биораспределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида, предложенной Tarogge et al. [4], несмотря на ее отдельные недостатки (отсутствие детализации костной ткани). Оценка доз проводилась с учетом облучения за счет дочерних продуктов цепочки распада  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида. Самые высокие поглощенные дозы в органах и эквивалентные дозы были определены для поверхности кости и красного костного мозга. Поглощенная доза от  $\alpha$ -излучения в поверхности кости за серию из 6 терапевтических процедур с введением  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида составляет 1 Гр; в красном костном мозге – 0,14 Гр.

Результаты работы продемонстрировали существенные (вплоть до двух порядков величины) различия между результатами собственной оценки поглощенных доз в радиочувствительных органах и тканях организма и опубликованными результатами (работы Lassmann et al. [5] и инструкции к РФП Ксофиго [20, 23]). Данные различия обусловлены использованием различных моделей биораспределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида (для здоровых людей в работе Lassmann et al.; для пациентов с мКРРПЖ – в настоящем исследовании) и исключения из учета отдельных радиочувствительных органов с низким накоплением  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида. Данные различия способны привести к существенным погрешностям при планировании курса радионуклидной терапии как при оценке накопления активности в метастатических костных очагах, так и при оценке поглощенных доз в органах и тканях организма. Данные факторы не столь значимы при проведении паллиативной терапии, но могут оказать влияние на дальнейшую тактику лечения пациента в случае положительного терапевтического эффекта и ремиссии. Необходимо дальнейшее совершенствование процессов оценки биораспределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида в организме, в частности – учета соотношения накопления между костными метастазами и здоровой костной тканью. Однако объем доступных экспериментальных данных ограничен и не позволяет выполнить их адекватную интерпретацию (различная локализация и размер метастатических очагов, различное накопление  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида в очагах и пр.).

## Благодарности

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам группы медицинской радиационной физики Лундского университета (Мальме, Швеция) за предоставленное программное обеспечение SAAM II v2.3 для оценки биораспределения  $^{223}\text{Ra}$ -дихлорида в органах и тканях пациентов с мКРРПЖ в рамках данной работы и помощь в проведении расчетов.

Литература

- Каприн А.Д., Старинский В.В., Петров Г.В. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. 2019. 250 с.
- Scher H., Morris M., Stadler W., et al. Trial design and objectives for castration-resistant prostate cancer: updated recommendations from the prostate cancer clinical trials working group 3 // *J Clin Oncol*. 2016. Vol. 34, No 12. P.1402–18.
- Чипига Л.А., Водоватов А.В., Петрова А.Е., Станжевский А.А. Анализ моделей биораспределения <sup>223</sup>Ra-дихлорида для оценки доз внутреннего облучения // *Формулы фармации*. 2020. Т. 2, №1. С. 54-69.
- Taprogge J., Murray I., Gear J., Chittenden S.J. Compartmental model for <sup>223</sup>Ra-Dichloride in patients with metastatic bone disease from castration-resistant prostate cancer // *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2019. P.1-9.
- Lassmann M., Lassmann M., Nosske D. Dosimetry of <sup>223</sup>Ra-chloride: dose to normal organs and tissues // *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2012. Vol. 40, No 2. P. 207–212.
- ICRP, 1973. Alkaline Earth Metabolism in Adult Man. ICRP Publication 20. Pergamon Press, Oxford. 423 p.
- ICRP Publication 67. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 2. Ingestion dose coefficients. *Annals of the ICRP*. 1993. 23(3-4)
- ICRP, 2018. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Annals of the ICRP*. 46(3-4).
- Barrett P.H., Bell B.M., Cobelli C. SAAM II: simulation, analysis, and modeling software for tracer and pharmacokinetic studies // *Metabolism*. 1998. Vol. 47, No. 4. P. 484–492.
- Программное обеспечение для анализа данных OriginLab: <https://www.originlab.com/demodownload.aspx> (Дата обращения: 16.08.2020)
- Andersson M., Johansson L., Minarik D. An internal radiation dosimetry computer program. IDAC 2.0. for estimation of patient dose for radiopharmaceuticals // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. No. 162. P. 299–305.
- ICRP Publication 107. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. *Ann. ICRP*. 2008. Vol. 38, No 3. P. 96.
- Dauer L.T., Williamson M.J., Humm J., et. al. Radiation Safety Considerations for the Use of <sup>223</sup>RaCl<sub>2</sub> DE in Men with Castration-resistant Prostate Cancer // *Health Physics*. 2014. No. 106. P. 494–504.
- Snyder W.S., Ford M.R., Warner G.G. Estimates of Specific Absorbed Fractions for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom. Medical Internal Radiation Dose Committee (NM/MIRD) Pamphlet No. 5, revised. Society of Nuclear Medicine. New York, NY. 1978. 52 p.
- Bruland Ø., Nilsson S.S., Fisher D.R., Larsen R.H. High-linear energy transfer irradiation targeted to skeletal metastases by the alphaemitter <sup>223</sup>Ra: adjuvant or alternative to conventional modalities? // *Clin Cancer Res*. 2006. P. 6250–6257.
- Sgouros G., Roeske J.C., McDevitt M.R., et al. MIRD Pamphlet No. 22 (abridged): radiobiology and dosimetry of alphaparticle emitters for targeted radionuclide therapy // *J Nucl Med*. 2010. No. 51. P. 311-328.
- Howell R.W., Goddu S.M., Narra V.R., et al. Radiotoxicity of gadolinium-148 and radium-223 in mouse testes: relative biological effectiveness of alpha-particle emitters in vivo // *Radiat Res*. 1997. No. 147. P. 342–348.
- Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной защите от 2007 г.: пер. с англ. / под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». 2009. 312 с.
- Публикация 60 МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной защите от 1990г.: пер. с англ. / под общ. ред. Т.Д. Кузьминой, И.Б. Кеирим-Маркуса. М.: Изд. Энергоатомиздат. 1994. 208 с.
- Poeppel T.D., Handkiewicz-Junak D., Andreeff M., et al. EANM guideline for radionuclide therapy with radium-223 of metastatic castration-resistant prostate cancer // *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2017. Vol. 45, No 5. P. 824–845.
- Chittenden S.J., Hindorf C., Parker C.C., et al. A Phase 1. Open-Label Study of the Biodistribution Pharmacokinetics and Dosimetry of <sup>223</sup>Ra-Dichloride in Patients with Hormone-Refractory Prostate Cancer and Skeletal Metastases // *Journal of Nuclear Medicine*. 2015. No. 56. P. 1304–1309.
- Hobbs R.F., Song H., Watchman C.J., et al. A bone marrow toxicity model for Ra-223 emitter radiopharmaceutical therapy // *Physics in Medicine and Biology*. 2012. No. 57. P. 3207–3222.
- Министерство здравоохранения Российской Федерации «Инструкция по медицинскому применению лекарственного препарата Ксофиго/Xofigo». 17 с.
- Uselmann A.J., Thomadsen B.R. On effective dose for radiotherapy based on doses to nontarget organs and tissues // *Medical Physics*. 2015. Vol. 42, No 2. P. 977-982.
- Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности GSR Part 3. МАГАТЭ, Вена. 2015. 518 с.
- International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection in Ion Beam Radiotherapy. ICRP Publication 127. *Annals of the ICRP*. 2014. Vol. 43, No. 4. P. 5-113.
- International Commission on Radiological Protection. Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies. ICRP Publication 112. *Annals of the ICRP*. 2009. Vol. 39, No. 4. P. 1-2.
- Loreti G., Delis H., Healy B., et. al. IAEA education and training activities in medical physics // *Medical physics international Journal*. 2015. Vol. 3, No. 2. P. 81-86.

Поступила: 02.09.2020 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; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Минздрава России. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com

**Петрова Анна Евгеньевна** – студентка Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**Водоватов Александр Валерьевич** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, Санкт-Петербург, Россия

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

**Лумпов Александр Александрович** – начальник лаборатории химического и радиохимического анализа Акционерного общества «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия

**Лаврешов Дмитрий Денисович** – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**Наурзбаева Лаура Талгатовна** – студентка Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**Кушнарченко Станислав Михайлович** – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**Мосунов Артем Алексеевич** – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**Для цитирования:** Чипига Л.А., Петрова А.Е., Водоватов А.В., Станжевский А.А., Лумпов А.А., Лаврешов Д.Д., Наурзбаева Л.Е., Кушнарченко С.М., Мосунов А.А. Определение органных доз внутреннего облучения пациентов при радионуклидной терапии  $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 6-16. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-6-16

---

## Patient organ and effective dose estimation in radionuclide therapy with $^{223}\text{Ra}$ -dichloride

Larisa A. Chipiga<sup>1,2,3</sup>, Anna E. Petrova<sup>4</sup>, Aleksandr V. Vodovатов<sup>1,5</sup>, Andrey A. Stanzhevsky<sup>2</sup>, Aleksandr A. Lumpov<sup>6</sup>, Dmitry D. Lavreshov<sup>4</sup>, Laura E. Naurzbaeva<sup>4</sup>, Stanislav M. Kushnarenko<sup>4</sup>, Artem A. Mosunov<sup>4</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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

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

<sup>3</sup> Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

<sup>4</sup> Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>5</sup> Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>6</sup> Khlopin Radium Institute, Saint-Petersburg, Russia

*Radionuclide therapy with  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride is used to treat bone metastases and to improve the quality of life of patients with metastatic castration-resistant prostate cancer. At the present time there is no reliable data on the biodistribution of the  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride in the patient body. The aim of this study was to assess absorbed, equivalent doses in radiosensitive organs and tissues and effective dose from internal exposure for patients with metastatic castration-resistant prostate cancer treated with  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride. Internal doses from  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride were calculated for a chamber model specific for patients with metastatic castration-resistant prostate cancer. This model consists of 8 chambers (blood plasma, two chambers describing bone tissue, small intestine, upper large intestine, lower large intestine, feces and the rest of the body). Time-integrated activities were calculated using the SAAM II v2.3 software. The IDAC-Dose 2.1 software was used to calculate the absorbed doses. The highest absorbed doses in organs and equivalent doses were determined for the bone surface and red bone marrow. The absorbed dose from  $\alpha$ -radiation in the bone surface for a set of six therapeutic procedures with  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride was estimated as 1 Gy; in the red bone marrow – 0.14 Gy. However, the approach used does not specifically consider accumulation of the radiopharmaceutical in metastases, which can lead to a significant overestimation of the absorbed dose in the healthy part of the bone surface and red bone marrow.*

---

**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

**Key words:** radionuclide therapy,  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride, prostate cancer, radiopharmaceuticals, internal dose, absorbed doses in organs, equivalent dose, effective dose.

## References

1. Caprin AD, Starinsky VV, Petrov GV. Malignant neoplasms in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Moscow: MNIIOI after P.A. Herzen is a branch of the Federal State Budgetary Institution "NMITS of Radiology" of the Ministry of Health of Russia 2019. 250 p. (In Russian)
2. Scher H, Morris M, Stadler W, Higano C, Basch E, Fizazi K, et al. Trial design and objectives for castration-resistant prostate cancer: updated recommendations from the prostate cancer clinical trials working group 3. *Journal of Clinical Oncology*. 2016;34(12): 1402–18.
3. Chipiga LA, Vodovatov AV, Petrova AE, Stanzhevsky AA. Analysis of  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride biodistribution models for assessing internal exposure doses. *Formulas of Pharmacy*. 2020;2(1): 54-69 (In Russian)
4. Taprogge J, Murray I, Gear J, Chittenden SJ. Compartmental model for  $^{223}\text{Ra}$ -Dichloride in patients with metastatic bone disease from castration-resistant prostate cancer. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2019; 1-9.
5. Lassmann M, Lassmann M, Nosske D. Dosimetry of  $^{223}\text{Ra}$ -Chloride: dose to normal organs and tissues. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2012;40(2): 207–212.
6. ICRP Publication 20. Alkaline Earth Metabolism in Adult Man. Pergamon Press, Oxford. 1973; 423 p.
7. ICRP Publication 67. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 2. Ingestion dose coefficients. *Annals of the ICRP*. 1993;23(3-4).
8. ICRP Publication 137. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. *Annals of the ICRP*. 2018;46(3-4).
9. Barrett PH, Bell BM, Cobelli C. SAAM II: simulation. analysis. and modeling software for tracer and pharmacokinetic studies. *Metabolism*. 1998;47(4): 484–492.
10. Data analysis software OriginLab [Internet]. Available from: <https://www.originlab.com/demodownload.aspx> [Accessed 16.08.2020]
11. Andersson M, Johansson L, Minarik D. An internal radiation dosimetry computer program. IDAC 2.0. for estimation of patient dose for radiopharmaceuticals. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014;162: 299–305.
12. ICRP Publication 107. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. *Annals of the ICRP*. 2008;38(3): 96.
13. Dauer LT, Williamson MJ, Humm J, O'Donoghue J, Ghani R, Awadallah R, et. al. Radiation Safety Considerations for the Use of  $^{223}\text{RaCl}_2$  DE in Men with Castration-resistant Prostate Cancer. *Health Physics*. 2014;106: 494–504.
14. Snyder WS, Ford MR, Warner GG. Estimates of Specific Absorbed Fractions for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom. Medical Internal Radiation Dose Committee (NM/MIRD) Pamphlet No. 5, revised. Society of Nuclear Medicine. New York, NY. 1978. 52 p.
15. Bruland Ø, Nilsson SS, Fisher DR, Larsen RH. High-linear energy transfer irradiation targeted to skeletal metastases by the alphaemitter  $^{223}\text{Ra}$ : adjuvant or alternative to conventional modalities? *Clinical Cancer Research*. 2006; 6250–6257.
16. Sgouros G, Roeske JC, McDevitt MR, Palm S, Allen BJ, Fisher DR, et. al. MIRD Pamphlet No. 22 (abridged): radiobiology and dosimetry of alphanuclide emitters for targeted radionuclide therapy. *Journal of Nuclear Medicine*. 2010;51: 311-328.
17. Howell RW, Goddu SM, Narra VR, Fisher DR, Schenter RE, Rao DV, et. al. Radiotoxicity of gadolinium-148 and radium-223 in mouse testes: relative biological effectiveness of alpha-particle emitters in vivo. *Radiation Research*. 1997;147: 342–348.
18. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian)
19. International Commission on Radiological Protection. 1991 recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 1991;21(1-3).
20. Poeppel TD, Handkiewicz-Junak D, Andreeff M, Becherer A, Bockisch A, Fricke E, et al. EANM guideline for radionuclide therapy with radium-223 of metastatic castration-resistant prostate cancer. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2017;45(5): 824–845.
21. Chittenden SJ, Hindorf C, Parker CC, Lewington VJ, Pratt BE, Johnson B, et al. A Phase 1. Open-Label Study of the Biodistribution Pharmacokinetics and Dosimetry of  $^{223}\text{Ra}$ -Dichloride in Patients with Hormone-Refractory Prostate Cancer and Skeletal Metastases. *Journal of Nuclear Medicine*. 2015;56: 1304–1309.
22. Hobbs RF, Song H, Watchman CJ, Bolch WE, Aksnes AK, Ramdahl T, et al. A bone marrow toxicity model for Ra-223 emitter radiopharmaceutical therapy. *Physics in Medicine and Biology*. 2012;57: 3207–3222.
23. Ministry of Health of the Russian Federation "Instructions for the medical use of the drug Xofigo". 17 p. (In Russian)
24. Uselmann AJ, Thomadsen BR. On effective dose for radiotherapy based on doses to nontarget organs and tissues. *Medical Physics*. 2015;42(2): 977-982.
25. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards GSR Part 3. IAEA, Vienna; 2015. 518 p. (In Russian)
26. International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection in Ion Beam Radiotherapy. ICRP Publication 127. *Annals of the ICRP*. 2014;43(4): 5-113.
27. International Commission on Radiological Protection. Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies. ICRP Publication 112. *Annals of the ICRP*. 2009;39(4): 1-2.
28. Loreti G, Delis H, Healy B, Izewska J, Poli GL, Meghifene A. IAEA education and training activities in medical physics. *Medical Physics International Journal*. 2015;3(2): 81-86.

Received: September 02, 2020

**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; docent, Almazov National Medical Research Centre. (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com)

**Anna E. Petrova** – student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

**Aleksandr V. Vodovatov** – Ph.D., Head of Protection Laboratory, Leading Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

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

**Aleksandr A. Lumpov** – Head of laboratory of chemical and radiochemical analysis, Khlopin Radium Institute, Saint-Petersburg, Russia

**Dmitry D. Lavreshov** – student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

**Laura T. Naurzbaeva** – student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

**Stanislav M. Kushnarenko** – student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

**Artem A. Mosunov** – student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Chipiga L.A., Petrova A.E., Vodovatov A.V., Stanzhevsky A.A., Lumpov A.A., Lavreshov D.D., Naurzbaeva L.E., Kushnarenko S.M., Mosunov A.A. Patient organ and effective dose estimation in radionuclide therapy with  $^{223}\text{Ra}$ -dichloride. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 4. P. 6-16. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-6-16

## Подходы к оценке полноты и качества регистров потомков облучённого населения

С.А. Шалагинов<sup>1,2</sup>, А.В. Аклеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уральский научно-практический центр радиационной медицины  
Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

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

*Неопределенности оценок радиационного риска отдаленных последствий облучения человека в значительной степени определяются полнотой и качеством эпидемиологических данных. Основную значимость для когортных исследований имеет регистр исследуемой когорты. Особые сложности возникают при формировании регистра потомков облученных лиц, которые, в отличие от их родителей, не подвергались радиационному воздействию. Формирование когорты потомков облученных лиц имеет свои особенности и требует оценки ее полноты и качества. Целью работы является изучение показателя соотношения полов как возможного критерия для оценки полноты и качества регистра потомков когорты реки Течи. Регистр потомков облученного населения на конец 2019 г. включал сведения на 25 930 лиц. Формирование регистра потомков облученного на реке Теча населения было начато в середине 1950-х гг. При этом использовались разнообразные документы, подтверждающие факт рождения ребёнка у облученных лиц. В популяции реки Течи доля потомков, зачатых только облученной матерью, составляет 22,2%, только облученным отцом – 13,9%, доля потомков, подвергшихся внутриутробному облучению, составляет 44,6%. В соответствии с общепринятыми данными литературы, в когорте потомков первого поколения следовало ожидать уменьшение рождения мальчиков. Однако по результатам проведенной работы у потомков не отмечено изменения соотношения полов при сравнении с популяционным контролем. Более того, установлено, что соотношение полов в популяции потомков первого поколения облученного на реке Тече населения нельзя рассматривать как вторичное. Не нашло подтверждения предположение о влиянии прекоцептивного облучения родителей, а также внутриутробного облучения на изменение соотношения полов. Показано, что снижение показателя соотношения полов связано с недоучетом потомков первого поколения мужского пола, умерших в детском и молодом возрасте. Величина соотношения полов в группах, сформированных в зависимости от характера и дозы облучения, зависела, главным образом, от источников информации, использованных при формировании регистра потомков.*

**Ключевые слова:** качество и полнота регистров, критерии оценки, потомки облученного населения, река Теча, соотношение полов, акты и свидетельства о рождении.

### Введение

В радиационной эпидемиологии большое внимание уделяется не только совершенствованию методологии исследований, но и качеству и полноте данных, в том числе медицинских и дозиметрических. Научный комитет по действию атомной радиации ООН указывает на необходимость учёта не только общих критериев качества, но и специфики отдельно проводимых исследований [1]. В то же время формирование регистров потомков облученных людей может быть сопряжено с методологическими проблемами, не характерными для формирования регистров самих облученных лиц. Как правило, эти регистры начинают создаваться спустя многие годы после формирования когорты облученных лиц, на фоне регулярно происходящих и не всегда учтённых случаев

миграции и смерти потомков. Особенно большие проблемы возникают при создании регистров потомков при хроническом, радиационном воздействии. В этом случае задача усложняется, так как некоторые потомки могут облучаться внутриутробно и постнатально. В зависимости от возраста родителей на время облучения потомки могут быть одновременно отнесены и к первому, и ко второму поколениям.

Одним из критериев качества регистров потомков облученного населения может быть показатель вторичного соотношения полов, определяемого на момент рождения. Являясь стабильным и предельно простым в определении, данный показатель в то же время может служить надёжным индикатором полноты и качества регистра.

**Шалагинов Сергей Александрович**

Уральский научно-практический центр радиационной медицины; Челябинский государственный университет  
**Адрес для переписки:** 454076, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, д. 68-А; E-mail: shalaginov@urcrrm.ru

Предполагается, что изменение вторичного (на момент рождения) соотношения полов у потомков облучённых лиц может определяться прекоцептивным облучением. При облучении матери следует ожидать уменьшения рождения мальчиков, при облучении отца – уменьшения рождения девочек. Изменение половой пропорции новорожденных может быть связано со сниженной жизнеспособностью эмбрионов и плодов мужского пола, их повышенной радиочувствительностью (по сравнению с эмбрионами и плодами женского пола) к самым разнообразным генетическим изменениям, а также влияниям внешних средовых воздействий, включая внутриутробное облучение [2–5]. D.W. Cox провел обзор литературы и сообщил, что из 12 исследований, касающихся потомства облученных отцов, в 10 соотношение полов было выше, чем в контроле. Из 10 исследований, описывающих потомство облученных матерей, в 9 соотношение полов было понижено [4].

Широкую известность получила гипотеза [2, 4], согласно которой распределение летальных мутаций, сцепленных с полом, среди потомков облучённых лиц будет различным в зависимости от того, был облучен отец или мать. Согласно данной гипотезе, при облучении отцов следует ожидать сдвига соотношения полов в сторону относительного увеличения мальчиков, так как индуцированные радиацией летальные мутации в X-хромосоме отцов будут передаваться только дочерям. При облучении только матерей будет наблюдаться уменьшение рождения мальчиков, т.к. возникшие X-сцепленные летальные мутации чаще будут проявляться у них, нежели у потомков женского пола. Если облучались оба родителя и если эффекты родительского облучения однонаправлены, пусть и не равны, следует ожидать уменьшения частоты рождения мальчиков, но не столь выраженного, как при облучении только матерей.

Вторичное соотношение полов, измеряемое как простая пропорция родившихся мальчиков к родившимся девочкам, у населения различных стран является достаточно стабильной характеристикой, изменяясь в интервале от 1,04 до 1,10. Более выраженные колебания данного показателя возникают сравнительно редко, и, как правило, их связывают с масштабным изменением численности и состава родительских популяций, реже – с неблагоприятными экологическими воздействиями [2, 6, 7].

Вопрос влияния ионизирующего излучения на соотношение полов обсуждается в литературе в течение длительного времени и не нашёл однозначного решения [2–5, 8–13]. Открытым остаётся вопрос о том, каким образом и в какой степени показатель соотношения полов связан с генетическими причинами и можно ли его использовать в качестве индикатора радиационно-индуцированных генетических повреждений. Недостаточно изучено соотношение полов у антенатально облучённых лиц.

В ранее проведенных исследованиях по анализу вторичного соотношения полов у потомков первого поколения облучённого на реке Тече населения были зафиксированы показатели несколько ниже предела, установленного для нормальных значений по данным литературы [5, 8, 9], что могло указывать на возможность влияния облучения гонад родителей на изменение данного показателя [9]. Однако в данном исследовании не было учтено влияние антенатального облучения, а также не было критически оценено качество источников инфор-

мации для формирования регистра потомков, способных повлиять на соотношение полов.

**Цель исследования** – изучение показателя соотношения полов как возможного критерия для оценки полноты и качества регистра потомков облучённого населения.

### Материалы и методы

К потомкам облученного на реке Тече населения отнесены лица, имеющие одного или двух родителей, которые проживали в период с 1 января 1950 г. по 31 декабря 1960 г. в прибрежных селах. В группу антенатально облучённых лиц были включены потомки членов Когорты Реки Течи, рожденные в вышеуказанный период и имеющие расчётную дозу антенатального облучения по системе TRDS-2016 [14–16]. Начиная с 1954 г., проводилось систематическое отслеживание рождения детей у облучённых на реке Тече лиц. На территории компактного проживания облучённого населения регулярно производилась выкопировка похозяйственных книг, направлялись запросы в областные отделы ЗАГСа, адресные столы и медицинские учреждения. Информацию о потомках, родившихся за пределами пунктов компактного расселения облучённых лиц, получали из документов, удостоверяющих личность, а также путем опросов как облученных родителей, так и самих потомков, а также их родственников в клинике ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России». На основе вышеуказанных источников информации был сформирован и постоянно поддерживался регистр потомков. Помимо сведений о половой принадлежности, регистр содержит информацию о дате и месте рождения, национальной принадлежности, сведения о родителях, информацию о местах проживания и дозиметрические данные. Средняя доза на гонады родителей составляла 0,154 Гр (максимальная 1,169 Гр), средняя доза внутриутробного облучения – 30,133 мГр (максимальная 1052,946 мГр) [15, 16].

Контрольная группа в настоящем исследовании представлена лицами, родившимися от необлучённых родителей, проживающих в момент рождения на «чистой» территории административных районов Челябинской области, территория которых только частично подверглась радиоактивному загрязнению в результате деятельности ПО «Маяк». Сведения по соотношению полов на этих лиц получены из ЦСУ Челябинской области.

С учётом нормального распределения численности потомков мужского и женского пола во всех сопоставляемых в ходе работы выборках, для статистической обработки использовался критерий соответствия Пирсона  $\chi^2$  [17]. Уровень статистической значимости оценивали при  $p < 0,05$ .

### Результаты и обсуждение

#### *Динамика и соотношение полов в отдельных группах потомков облучённого на реке Тече населения*

Можно видеть (табл. 1), что в целом среди потомков облучённого на реке Тече населения соотношение полов составило 1,03, в то время как в контроле 1,05,  $p > 0,05$ . В группах с одним облучённым родителем (мать или отец) и в группе с двумя облучёнными родителями соотношение полов находилось в интервале от 1,01 в группе с облучённым отцом до 1,07 в группе с облучённой матерью, не обна-

Соотношение полов среди потомков облученного населения с двумя или одним облучённым родителем

Таблица 1

[Table 1

Sex ratio among the offspring whose either one or both parents were exposed]

Группа потомков [Group of offspring]	Число потомков [Amount of offspring]	Число потомков мужского пола [Amount of male offspring]	Число потомков женского пола [Amount of female offspring]	Соотношение полов [Sex ratio]
Облучались оба родителя [Both parents were exposed]	16 575	8373	8202	1,02
Облучался только отец [Only father was exposed]	3595	1804	1791	1,01
Облучалась только мать [Only mother was exposed]	5760	2974	2786	1,07
Всего потомков облучённых [Total amount of offspring]	25 930	13 151	12 779	1,03
Контроль [Control group]	120 843	61 872	58 971	1,05

руживая достоверных различий. Полученные данные, таким образом, не соответствуют гипотезе [2, 4], согласно которой при облучении матерей соотношение полов должно смещаться в сторону относительного уменьшения мальчиков, а при облучении отца – в сторону уменьшения девочек.

Из рисунка можно видеть, что динамика соотношения полов среди потомков облучённого населения и в контроле имеет сходные черты. Периоды увеличения и уменьшения показателя в одной группе, в основном, соответствуют периодам увеличения и уменьшения в другой.

Наличие сходной динамики изменения соотношения полов указывает на единство происхождения, генетическое родство и социально-экономическое сходство двух изучаемых выборок. Однако по мере перехода к потом-

кам, родившимся в отдалённых от 1950–1954 гг. периодах, различия между основной и контрольной группами становятся более выраженными, что, по нашему мнению, не связано с влиянием радиационного фактора. Родители потомков 1950–1954 годов рождения имели максимальную мощность дозы на гонады, которая в последующие годы неуклонно снижалась. В период с 1950 по 1954 г. сформировано более 90% накопленной гонадной дозы. В этой же группе потомков зафиксированы наибольшие дозы внутриутробного облучения, в десятки раз превышающие дозы для лиц, рожденных в 1955–1960 гг., а родившиеся после 1960 г. внутриутробно практически не облучались. Исходя из вышесказанного, наибольшего снижения соотношения полов по сравнению с контролем, предположительно обусловленного радиационным фактором, следовало ожидать в группе лиц, родившихся в период с 1950 по 1954 г., с последующим повышением среди лиц, родившихся в 1955–1960 гг. и после 1960 г. В реальности (см. рис.) мы наблюдаем иную тенденцию: за весь период с 1950 по 1960 г. соотношение полов практически не меняется, снижение доли родившихся мальчиков отмечается только в период после 1969 г., что противоречит предположению о влиянии радиационного фактора на соотношение полов у потомков облучённого на реке Тече населения.

Как следует из таблицы 2, в группах потомков облучённого населения, не подвергшихся внутриутробному

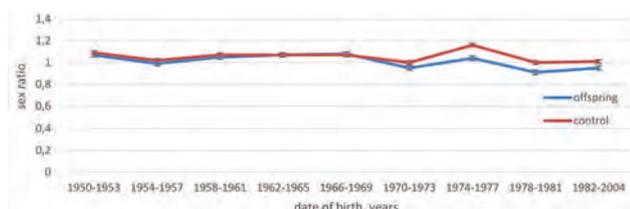


Рис. Повозрастная динамика вторичного соотношения полов среди потомков первого поколения населения, облучившегося на реке Тече, и в контроле

[Fig. Age-specific dynamics of secondary sex ratio among the first-generation offspring of the exposed Techa River population and in the control group]

Соотношение полов в группах потомков первого поколения с учётом антенатального облучения

Таблица 2

[Table 2

Sex ratio in the groups of the first generation offspring with due account of prenatal exposure]

Группы потомков [Groups of offspring]	Число мальчиков [Boys]	Число девочек [Girls]	Соотношение полов [Sex ratio]
Антенатально облучённые потомки [Prenatally exposed offspring]	5860	5714	1,03
Потомки без антенатального облучения [Offspring without prenatal exposure]	7291	7065	1,03
Всего потомков [Total amount of offspring]	13 151	12 779	1,03

радиационному воздействию, так же, как и среди антенатально облучённых потомков, зафиксированы идентичные показатели соотношения полов – 1,03. Согласно представленным данным, антенатальное облучение не внесло какого-либо вклада в изменение соотношения полов.

Ожидаемым эффектом антенатального радиационного воздействия является более высокая внутриутробная гибель представителей мужского пола, однако, как можно видеть из таблицы 3, зависимости соотношения полов от дозы не наблюдается – по мере увеличения дозы антенатального облучения мы не видим последовательного увеличения рождения потомков женского пола. Значение соотношения полов в дозовых группах 1,0–9,9 мГр, 50 мГр и более составляет 1,00 и 1,02, что несколько ниже считающегося нормальным диапазона значений (1,04–1,10). Однако следует учитывать небольшие размеры дозовых групп.

Из таблицы 4 можно видеть, что в группе потомков, родившихся в 1950–1969 гг., соотношение полов составило 1,05, а в идентичной по периоду рождения контрольной группе – 1,06 ( $p > 0,05$ ). Для лиц 1970 года рождения и моложе соотношение полов среди потомков облучённых

составило 0,97, в то время как в контроле 1,04 ( $p < 0,025$ ).

Как следует из таблицы 5, среди потомков, рожденных в 1950–1969 гг., в группе с облучённой матерью имеется тенденция к увеличению девочек по сравнению с группами с облучённым отцом и обоими облучёнными родителями ( $p > 0,05$ ). В группе потомков, родившихся в период с 1970 г. и позже, отмечена аналогичная, но менее выраженная тенденция.

*Оценка основных причин изменения соотношения полов у потомков облучённого на реке Тече населения не связанных с влиянием облучения*

Отсутствие доказательств влияния радиационного фактора на изменение соотношения полов у потомков облучённого на реке Тече населения может определяться не только и не столько действием радиации, сколько методологическими причинами. Регистр потомков первого поколения облучённого на реке Тече населения, по-видимому, не является полным. Причиной неполноты регистра может быть неконтролируемая миграция облучённого населения (в особенности лиц трудоспособного, репродуктивно активного возраста), усилившаяся среди жителей реки Течи в 1960–1970-е гг. [8,

Таблица 3  
Распределение соотношения полов среди антенатально облучённых лиц в зависимости от дозы на эмбрион и плод

[Table 3]

**Distribution of the sex ratio among prenatally exposed persons depending on the dose to embryo and fetus**

Дозовые группы, мГр [Dose groups, mGy]	Число мальчиков [Boys]	Число девочек [Girls]	Соотношение полов [Sex ratio]
Менее 1,0 [< 1.0]	1747	1656	1,05
1–9,9 [1.0-9.9]	2422	2423	1,00
10,0–49,9 [10.0-49.9]	835	795	1,05
50 и более [≥50]	856	840	1,02
Всего [Total]	5860	5714	1,03

Таблица 4  
Соотношение полов у потомков облучённого на реке Тече населения, родившихся в периоды 1950–1969 гг., а также 1970 г. и позже

[Table 4]

**Sex ratio of the exposed Techa River population offspring born in 1950-1969, and in 1970 and later**

Возрастные группы потомков [Age groups of offspring]	Основные [Main group]			Контроль [Control group]		
	Число мужчин [Men]	Число женщин [Women]	Соотношение полов [Sex ratio]	Число мужчин [Men]	Число женщин [Women]	Соотношение полов [Sex ratio]
1950–1969	10 153	9688	1,05	27 686	26 028	1,06
1970 и моложе [1970 and younger]	2998	3091	0,97*	34 186	32 943	1,04

\* $p < 0,025$  при сравнении с соответствующим по возрасту контролем.  
[\* $p < 0.025$  when compared to the control group corresponding in age].

Соотношение полов для родившихся в период с 1950 по 1969 г. и в период 1970 г. и позже в зависимости от факта облучения одного из родителей

Таблица 5

[Table 5]

**Sex ratio of those born in 1950–1969 and in 1970 and later depending on the exposure of the parents**

Группы потомков облучённых [Groups of the exposed persons offspring]	Родившиеся в 1950–1969 гг. [1950-1969]			Родившиеся в 1970 г. и позже [1970 and later]		
	Число мужчин [Men]	Число женщин [Women]	Соотношение полов [Sex ratio]	Число мужчин [Men]	Число женщин [Women]	Соотношение полов [Sex ratio]
Облучились оба родителя [Both parents were exposed]	7214	6979	1,03	1159	1223	0,95
Облучился только отец [Only father was exposed]	889	844	1,05	915	947	0,97
Облучилась только мать [Only mother was exposed]	2050	1865	1,10	924	921	1,00
Контроль [Control group]	27 686	26 028	1,06	34 186	32 943	1,04

18]. Как видно из таблицы 6, регистр потомков облучённого на реке Тече населения формировался из разных источников. Основными источниками являлись акты и свидетельства о рождении. В ряде случаев источником информации служили лично предъявленные потомками

и их родителями в различные периоды жизни потомков документы, удостоверяющие личность. Реже внесение в регистр потомков осуществлялось только на основе свидетельских показаний потомков облучённых лиц и их родственников.

Распределения соотношения полов в группах потомков облучённого населения в зависимости от источника получения информации

Таблица 6

[Table 6]

**Distribution of the sex ratio in the groups of the exposed population offspring depending on the source of information**

Источник получения информации [Source of information]	Число мальчиков [Boys]	Число девочек [Girls]	Соотношение полов [Sex ratio]
Акт о рождении (ЗАГС) [Entry of birth (ZAGS)]	5508	5294	1,04*
Свидетельство о рождении [Birth certificate]	2885	2950	0,98
Паспорт [Passport]	777	881	0,88
Документ, кроме паспорта и свидетельства о рождении [Other document of identification]	1894	1558	1,22**
Похозяйственная книга [Household register]	410	359	1,14
Свидетельские показания без документов [Statements of evidence without documents that prove birth of a person]	1508	1515	0,99
Личное свидетельство без документов [Appearance in person without documents of identification]	169	222	0,76
Всего [Total]	13 151	12 779	1,03

\* p<0,05 при сравнении с группой, установленной по паспорту;  
\*\*p<0,001 при сравнении с группой, установленной по паспорту.  
[\* p<0.05 when compared to the group, identified by passport;  
\*\*p<0.001 when compared to the group, identified by passport].

Данные, представленные в таблице 6, свидетельствуют в пользу того, что соотношение полов у потомков первого поколения облучённого на реке Тече населения зависит от источников информации для формирования регистра. Так, например, соотношение полов, рассчитанное на основе актов о рождении, достоверно смещено в сторону относительного увеличения девочек при сравнении с соотношением полов для группы детей, сведения для которой получены из удостоверений личности (кроме паспорта и свидетельства о рождении), – 1,04 и 1,22 соответственно,  $p < 0,05$ . Документы, удостоверяющие личность (кроме паспорта и свидетельства о рождении, это военные билеты, служебные удостоверения, пропуска, водительские удостоверения), заведомо чаще имеют и предъявляют мужчины, нежели женщины.

Необходимо отметить, что когорта потомков первого поколения является усечённой, привязанной, с одной стороны, к периоду радиационного воздействия (1950–1960-е гг.), с другой стороны – к периоду окончания репродукции женщин (для большинства женщин это возраст, близкий к 40 годам). Таким образом, в когорте потомков убыль числа родившихся после 1969 г. будет обусловлена исчерпанием репродуктивного потенциала стареющей и не восполняющейся молодыми родителями из КРТ. Используемая в настоящем исследовании контрольная группа не является усечённой во времени, и в ней не происходит постарение родителей, так как на место выбывших по возрасту лиц в репродукцию вступают новые молодые родители.

В таблице 7 используется показатель возраста вступления женщин в процесс воспроизводства, равный 22 годам [8]. В основной группе лица, достигшие возраста 22 лет в 1972 г. и далее, – это матери 1950 года рождения

и младше, являющиеся сами потомками первого поколения. В возрастной группе потомков, родившихся в 1972 г. и позднее, в отличие от контрольной группы, закономерно увеличивается средний возраст родителей на момент зачатия и рождения ребёнка, который является фактором, уменьшающим вероятность рождения мальчиков [19, 20]. Таким образом, наиболее адекватную оценку влияния ионизирующего излучения на изменение соотношения полов в группе потомков первого поколения при сравнении с популяционным контролем можно получить для лиц 1950–1969 годов рождения, родившихся от облучённых родителей 1949 года рождения и старше.

Из таблицы 8 можно видеть, что для лиц 1950–1969 годов рождения доля сертификатов и свидетельств о рождении составляет 74,7%, в то время как для лиц 1970 года и младше – только 64,2%. В то же время доля потомков, включённых в регистр на основе свидетельских показаний, увеличивается с 6,6% до 13,1%.

Очевидно, что максимально надёжными, дающими объективное представление о вторичном соотношении полов являются данные, зафиксированные в документах непосредственно на момент рождения (акты о рождении). Все прочие сведения могли быть получены для потомков по достижении ими различного возраста. Например, после 16 лет в случае предъявления паспорта и в любом возрасте – свидетельства о рождении. В этих случаях из анализа исключаются лица, умершие на ранних этапах, среди которых преобладают мальчики и молодые мужчины [2]. Кроме того, в случае непосредственной явки облучённого лица в клинику ФГБУН УНПЦ РМ следует учитывать, что женщины чаще обращаются за медицинской помощью, чем мужчины. С учётом вышеперечисленных фактов, соотношение полов среди потомков облучённо-

Таблица 7

**Динамика изменения репродуктивного возраста матерей у потомков 1-го поколения и в контроле**

[Table 7

**Dynamic pattern of reproductive age of the mothers among the 1<sup>st</sup> generation offspring and in the control group]**

Основные [Main group]		Контроль [Control group]	
Год рождения потомков [Offspring birth year]	Год рождения матерей, вступающих в репродукцию (22 года) [Age at the time of the 1st labor (22 years)]	Год рождения потомков [Offspring birth year]	Год рождения матерей, вступающих в репродукцию (22 года) [Age at the time of the 1st labor (22 years)]
1950–1953	1928–1931	1950–1953	1928–1931
1954–1957	1932–1935	1954–1957	1932–1935
1958–1961	1936–1939	1958–1961	1936–1939
1962–1965	1940–1943	1962–1965	1940–1943
1966–1969	1944–1947	1966–1969	1944–1947
1970–1973	1948–1949	1970–1973	1948–1951
1974–1977	0	1974–1977	1952–1955
1978–1981	0	1978–1981	1956–1959
1982–1985	0	1982–1985	1960–1963
1986–1989	0	1986–1989	1964–1967
1990 и младше [1990 and younger]	0	1990 и младше [1990 and younger]	1968 и младше [1968 and younger]

**Вклад различных источников информации о рождении потомков облучённого населения в зависимости от периода их рождения**

[Table 8]

**Contribution of various sources of information on the birth of the exposed population offspring depending on the period of their birth**

Источник получения информации [Source of information]	Возрастные группы, год рождения [Age groups, birth year]					
	1950–1969 [1950-1969]		1970 и младше [1970 and younger]		Всего потомки [Total]	
	Число [Number]	Доля, % [Percentage, %]	Число [Number]	Доля, % [Percentage, %]	Число [Number]	Доля, % [Percentage, %]
Акты и свидетельства о рождении [Birth entries and birth certificates]	14 816	74,7	1821	30,0	16 637	64,2
Документ, удостоверяющий личность, похозяйственная книга [Personal identity document, Household register]	3713	18,7	2166	35,6	5879	22,7
Свидетельские показания, личное свидетельство [Statement of evidence, appearance in person]	1312	6,6	2102	34,5	3 414	13,1
Всего [Total]	19 841	100,0	6089	100,0	25 930	100,0

го на реке Теча населения, включённых в регистр, должно закономерно смещаться в сторону относительного увеличения женщин. Таким образом, показатель соотношения полов, рассчитанный на основе регистра, сформированного при использовании различных источников информации, не может быть корректным. Помимо этого, в подобном случае соотношение полов нельзя рассматривать как вторичное.

### Заключение

В результате проведенной работы не выявлено радиационно-индуцированного изменения соотношения полов у потомков первого поколения облучённого на реке Тече населения при сравнении с популяционным контролем, составленным из населения, проживающего на сопредельных территориях. Не нашло подтверждения предположение о влиянии отцовского или материнского облучения на изменение соотношения полов и не установлен вклад внутриутробного облучения. Вместе с тем, было показано, что соотношение полов среди потомков первого поколения облучённого на реке Тече населения по сути не является вторичным соотношением полов, то есть соотношением, зафиксированным на момент рождения. Наиболее значительные отклонения от популяционного контроля выявлены для группы лиц 1969 года рождения и старше, что не соответствует предположению о влиянии гонад родителей на момент зачатия, а также предположению о влиянии внутриутробного облучения.

Получены убедительные доказательства влияния особенностей формирования регистра и методологии сбора данных о рождении на соотношение полов у потомков первого поколения, связанные с использованием различных источников информации. Таким образом, предлагаемая авторами оценка отклонения от популяционных стандартов вторичного соотношения полов может быть

рекомендована в качестве одного из критериев полноты и качества регистра потомков облучённых людей.

### Литература

1. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2018. 194 p.
2. Фогель Ф., Мотульски А. Генетика человека: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. Т.1, 308 с.
3. Schull W.J., Neel J.V., Hashizume A. Some further observations on the sex ratio among infants born to survivors of the atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki // American Journal of Human Genetics. 1966. V. 18, No. 4. P. 328–338.
4. Cox D.W. An investigation of possible genetic damage in the offspring of women receiving multiple diagnostic pelvic X-rays // American Journal of Human Genetics. 1964. V. 16. P. 214–230.
5. Пастухова Е.И., Шалагинов С.А., Аклеев А.В. Вторичное соотношение полов у населения радиоактивно загрязнённых районов Челябинской области // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 4. С. 28–37.
6. Allan B.B., Brant R., Seidel J.E., Jarrell J.F. Declining sex ratios in Canada // Canadian Medical Association Journal. 1997. V. 156, No. 1. P. 37–41.
7. Biggar R.J., Wohlfahrt J., Westergaard T., et al. // American Journal of Epidemiology. 1999. No. 150. P. 957–962.
8. Аклеев А.В., Новосёлов В.Н., Шалагинов С.А., Буртовая Е.Ю. Под ред. А.В. Аклеева. Теча: До и после атомного проекта. Челябинск, 2015. 345 с.
9. Аклеев А.В., Аклеев А.А., Блинова Е.А., и др. Возможности адаптации к малым дозам радиации. СПб.: СпецЛит, 2019. 111 с.
10. Maconochie N., Roman E., Doyle P., et al. Sex ratio of nuclear industry employees' children // Lancet. 2001. Vol. 357. P. 1589–1591.
11. Reulen R.C., Zeegers M.P.A., Lancashire E., et al. Offspring sex ratio and gonadal irradiation in the British Childhood Cancer Survivor Study // British Journal of Cancer. 2007. Vol. 96, P. 1439–1441.

12. Dickinson H.O., Parker L., Binks K., et al. The sex ratio of children in relation to paternal preconceptional radiation dose: a study in Cumbria, northern England // *Journal Epidemiological Community Health*. 1996. Vol. 50. P. 645–652.
13. Scherb H., Voigt K. The human sex odds at birth after the atmospheric atomic bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities // *Environmental Science and Pollution Research International*. 2011. № 5. P. 697–707.
14. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев В.Н., Аклеев А.В. Уральская когорта аварийно-облучённого населения // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2019. № 3. С. 61–70.
15. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I., et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures // *Health Phys*. 2019. Vol. 117, No 4. P. 378–387.
16. Krestinina L.Yu., Kharyuzov Y.E., Epifanova S.B., et al. Cancer incidence after In Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents // *Radiat. Res*. 2017. V. 88, No 3. P. 314–324.
17. Гланц С. Медико-биологическая статистика: Пер. с англ. М.: Практика, 1998. 459 с.
18. Шалагинов С.А., Крестинина Л.Ю., Старцев Н.В., Аклеев А.В. Особенности расселения потомков первого поколения облучённого на реке Теча населения // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 2. С. 6–15.
19. James W.H., Rostron J. Parental age, parity and sex ratio in births in England and Wales 1968–1977 // *Journal of Biosocial Sciences*. 1985. Vol. 17. P. 47–56.
20. Jacobsen R., Moller H., Mouritsen A. Natural variation in the human sex ratio // *Human Reproduction*. 1997. Vol. 14, No 12. P. 3120–3125.

Поступила: 25.06.2020 г.

**Шалагинов Сергей Александрович** – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России; доцент кафедры радиобиологии Челябинского государственного университета. **Адрес для переписки:** 454076, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, д. 68-А; E-mail: shalaginov@urcrm.ru

**Аклеев Александр Васильевич** – заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор медицинских наук, профессор, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России; заведующий кафедрой радиационной биологии Челябинского государственного университета, Челябинск, Россия

**Для цитирования:** Шалагинов С.А., Аклеев А.В. Подходы к оценке полноты и качества регистров потомков облучённого населения // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 4. С. 17–25. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-17-25

## Approaches to the assessment of completeness and quality of the registry of exposed population offspring

Sergey A. Shalaginov<sup>1,2</sup>, Alexander V. Akleyev<sup>1,2</sup>

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

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

*Uncertainties of radiation risk of late radiation exposure effects in humans are to a great extent determined by completeness and quality of epidemiological data. The registry of the studied cohort is of fundamental importance for the cohort studies. Particular difficulties appear in the course of development of the exposed population offspring registry as these people in contrast to their parents were not affected by radiation exposure. The formation of the cohort of the exposed population offspring has its peculiarities and requires evaluation of its completeness and quality. The objective of this research is to study the value of the sex ratio as a possible criterion to assess the completeness and quality of the registry of the Techa River Cohort offspring. The register of descendants of the irradiated population at the end of 2019 included information on 25930 persons. The formation of the register of descendants of the population irradiated on the Techa River was started in the mid-1950s. At the same time, various documents were used to confirm the fact of birth of a child in irradiated persons. In the Techa River population the proportion of offspring with exposed mother and unexposed father is 22.2%, those with exposed father and unexposed mother made up 13.9%; the proportion of in utero exposed offspring is 44.6%. In accordance to the widely accepted published data it was to be expected that the number of male 1<sup>st</sup>-generation offspring in the cohort would be lower. However, the results of the conducted research show no changes in the sex ratio among offspring relative to the population-based control. Moreover,*

**Sergey A. Shalaginov**

Urals Research Center for Radiation Medicine; Chelyabinsk State University

**Address for correspondence:** Vorovsky str., 68-A, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: shalaginov@urcrm.ru

it was stated that the sex ratio in the population of the 1<sup>st</sup>-generation offspring of the exposed residents of the Techa River settlements should not be viewed as secondary. The assumption about the influence of the pre-conceptual exposure of the parents as well as that of the in utero exposure on changes in the sex ratio was not confirmed. It is shown that the decrease in the value of the sex ratio is associated with misreporting of the male 1<sup>st</sup>-generation offspring who died in childhood and at young age. The value of the sex ratio in groups formed based on the character and dose of exposure, depended mainly on the source of information used in the course of the offspring registry development.

**Key words:** quality and completeness of registries, assessment criteria, exposed population offspring, Techa River, sex ratio, birth certificates and birth entries.

## References

1. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York; 2018: 194 p.
2. Vogel F, Motulsky AG. Human genetics. Translated from English. Moscow: Mir; 1989. No. 1. 308 p. (In Russian)
3. Schull WJ, Neel JV, Hashizume A. Some further observations on the sex ratio among infants born to survivors of the atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki. *American Journal of Human Genetics*. 1966;18(4): 328–338.
4. Cox DW. An investigation of possible genetic damage in the offspring of women receiving multiple diagnostic pelvic X-rays. *American Journal of Human Genetics*. 1964;16: 214–230.
5. Pastukhova EI, Shalaginov SA, Akleyev AV. Secondary sex ratio in population of radioactively contaminated raions of the Chelyabinsk Oblast. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of Radiation Safety*. 2011;4: 28-37 (In Russian)
6. Allan BB, Brant R, Seidel JE, Jarrell JF. Declining sex ratios in Canada. *Canadian Medical Association Journal*. 1997;156(1): 37–41.
7. Biggar RJ, Wohlfahrt J, Westergaard T, Melbye M. Sex Ratios, Family Size, and Birth Order. *American Journal of Epidemiology*. 1999;150: 957–962.
8. Akeyev AV, Novosyolov VN, Shalaginov SA, Burtovaya EYu. Ed. by AV Akleyev. Techa: prior to and after the atomic project. Chelyabinsk; 2015. 345 p. (In Russian)
9. Akeyev AV, Akeyev AA, Blinova EA, Kotikova AI, Tryapitsyna GA, Pryakhin EA, et al. The potential of adaptation to low doses of radiation. Saint-Petersburg: Spetslit; 2019. 111 p. (In Russian)
10. Maconochie N, Roman E, Doyle P, Davies G, Beral V. Sex ratio of nuclear industry employees' children. *Lancet*. 2001;357: 1589–1591.
11. Reulen RC, Zeegers MPA, Lancashire E, Winter DL, Hawkins MM. Offspring sex ratio and gonadal irradiation in the British Childhood Cancer Survivor Study. *British Journal of Cancer*. 2007;96: 1439–1441.
12. Dickinson HO, Parker L, Binks K, Wakeford R, Smith J. The sex ratio of children in relation to paternal preconceptional radiation dose: a study in Cumbria, northern England. *Journal Epidemiological Community Health*. 1996;50: 645–652.
13. Scherb H, Voigt K. The human sex odds at birth after the atmospheric atomic bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2011;5: 697-707.
14. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev NV, Akleyev AV. South Urals Population Exposed to Radiation cohort. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;3: 61-70 (In Russian)
15. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387.
16. Krestinina LYu, Kharyuzov YE, Epiphanova SB, Tolstykh EI, Deltour I, Sch z J, et al. Cancer Incidence after In Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents. *Radiation Research*. 2017;88(3): 314-324.
17. Glantz S. Primer of biostatistics: Translated from English. Moscow: Praktika; 1998. 459 p.
18. Shalaginov SA, Krestinina LYu, Startsev NV, Akleyev AV. Peculiarities of the resettlement of the first generation offspring of the exposed Techa River population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(2): 6-15 (In Russian)
19. James WH, Rostron J. Parental age, parity and sex ratio in births in England and Wales 1968–1977. *Journal of Biosocial Sciences*. 1985;17: 47–56.
20. Jacobsen R, Moller H, Mouritsen A. Natural variation in the human sex ratio. *Human Reproduction*. 1997;14(12): 3120–3125.

Received: June 25, 2020

**For correspondence: Sergey A. Shalaginov** – Candidate of Medical Science, Senior Researcher, Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency; Assistant Professor of Radiobiology Department, Chelyabinsk State University (Vorovsky str., 68-A, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: shalaginov@urcrm.ru)

**Alexander V. Akleyev** – Honored Science Worker of the Russian Federation, Dr. habil. med., Professor, Director of the Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency; Head of the Radiobiology Department, Chelyabinsk State University

**For citation: Shalaginov S.A., Akleyev A.V. Approaches to the assessment of completeness and quality of the registry of exposed population offspring. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 17-25. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-17-25**

## Реконструкция параметров радиозоологической модели по результатам мониторинга радиационной обстановки в Мазовии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Варшавского» сценария проекта МАГАТЭ EMRAS)

О.К. Власов<sup>1</sup>, И.А. Звонова<sup>2</sup>, П. Краевский<sup>3</sup>, Н.В. Щукина<sup>1</sup>, С.Ю. Чекин<sup>1</sup>, К.А. Туманов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

<sup>2</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>3</sup> Центральная лаборатория радиологической защиты, Варшава, Польша

*В работе проанализирована согласованность входных данных радиозоологической модели: результатов измерений концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере после аварии на Чернобыльской АЭС в г. Варшава, метеоданных об осадках в период основных радиоактивных выпадений, значений минимальных плотностей выпадений  $^{137}\text{Cs}$  на территориях двух молочных районов Warsaw Area и Ostroleka Area в центральной части Мазовии. Согласно метеоданным, в Warsaw Area в период радиоактивных выпадений местами прошли локальные дожди. В Ostroleka Area, согласно данным всех метеостанций, осадков в этот период не было. Установлено, что в Warsaw Area минимальная плотность выпадений  $^{137}\text{Cs}$ , равная 1,3 кБк/м<sup>2</sup>, с погрешностью менее 10% согласуется с плотностью «сухих» выпадений  $^{137}\text{Cs}$  (1,2 кБк/м<sup>2</sup>), реконструированных имитационной агроклиматической моделью по данным измерений концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере. Такое согласие с учетом количества осадков, зарегистрированных на метеостанциях, в период радиоактивных выпадений и значительный (более 10 раз) разброс плотностей выпадений  $^{137}\text{Cs}$  по территории района Warsaw Area, предполагает, что для этого региона при радиозоологическом моделировании предпочтительнее использовать модель однородного облака – неоднородных осадков. Для района Ostroleka Area разброс плотностей выпадений  $^{137}\text{Cs}$  оказался сравнительно небольшим – 3,2, а расчетная плотность сухих выпадений  $^{137}\text{Cs}$  была в 2,0–2,7 раза меньше измеренных минимальных плотностей выпадений в округах и населенных пунктах. Такое расхождение с учетом отсутствия осадков, зарегистрированного всеми метеостанциями в период радиоактивных выпадений, послужило основанием для предположения о том, что концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере Ostroleka Area были в 2–2,7 раза больше, чем в Warsaw Area. Введенную на основании этого корректировку значений концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере Ostroleka Area для этого района предполагается верифицировать с помощью результатов измерений удельных активностей  $^{131}\text{I}$  в молоке согласно «Варшавскому» сценарию.*

**Ключевые слова:** авария на ЧАЭС, проект МАГАТЭ «EMRASS», «Варшавский» сценарий, имитационная агро-радио-экологическая модель,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере, «сухие» и «влажные» выпадения, плотность выпадения  $^{137}\text{Cs}$ .

### Введение

Настоящая работа является третьей в серии работ авторов, посвященной исследованиям динамики транспорта радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  по трофической цепочке: атмосфера – почва – растительность – корова – молоко – организм человека методом имитационного радиозоологического моделирования на основе экспериментальных данных, полученных после аварии на ЧАЭС [1, 2].

Первая работа этой серии [1] посвящена описанию технологии и созданию базы входных данных расчетной модели для регионов Мазовии (Польша) и Богемии (Чехия): временные зависимости концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере и их средние значения за период основных выпадений, количество осадков в период выпадений и плотности выпадения  $^{137}\text{Cs}$  на почву. Для взаимного согласования этого набора данных использовались 3 модели: прямого расчёта, модель «однородное облако – неодно-

**Власов Олег Константинович**

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба

Адрес для переписки: 249036, Калужская область, г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4; E-mail: vlasov@nrer.ru

родные осадки» и модель «неоднородное облако – однородные осадки» (см. Приложение).

В работе [1] было показано, что в целом для населенных пунктов исследуемых регионов Мазовии и Богемии прямой расчет плотностей выпадения  $^{137}\text{Cs}$  по модели несогласованных данных (однородное облако – метеоданные об осадках на ближайших к ним метеостанциях) дает существенное отличие (до семи раз), как от инструментальных измерений плотностей выпадения  $^{137}\text{Cs}$ , так и от результатов, полученных с помощью моделей, использующих согласованные данные: однородное облако – неоднородные эффективные осадки и неоднородное облако – однородные осадки по данным ближайших метеостанций. Причем отличие было тем больше, чем больше плотность выпадений  $^{137}\text{Cs}$ . Вывод, сделанный на основе этих расхождений [1], заключался в том, что взаимное согласование данных агроэкологических имитационных моделей, концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере, плотностей выпадения  $^{137}\text{Cs}$  и количества осадков в период выпадений, приводящее к адекватному воспроизведению инструментальных данных о плотностях выпадений  $^{137}\text{Cs}$  на местность, должно привести к существенному уменьшению неопределенностей транспорта  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  по пищевой цепочке и, как следствие, к более точной реконструкции доз внутреннего облучения населения загрязненных территорий.

Это предположение было проверено на данных «Варшавского» сценария проекта «EMRAS», разработанного МАГАТЭ на основе экспериментальных данных, полученных после аварии на Чернобыльской АЭС, для сравнения разных радиозоологических моделей оценки доз облучения населения в аварийных ситуациях [3]. В «Варшавском» сценарии были представлены различные данные мониторинга радиационной обстановки в двух районах молочного производства Мазовии (область Польши) – Warsaw Area и Ostroleka Area и города Варшавы.

На рисунке 1 показано расположение провинции Мазовия относительно Чернобыля и двух молочных округов Warsaw и Ostroleka в Мазовии. Видно, что размеры молочных районов Мазовии малы ( $\approx 50$  км) по сравнению с расстоянием от этих районов до Чернобыльской АЭС ( $\approx 500$  км) и сопоставимы с расстояниями между их центрами ( $\approx 60$  км). Поэтому в первом приближении в [2] было принято предположение о пространственной однородности параметров радиоактивного загрязнения атмосферы в обоих районах. Однако это приближение приводило для района Ostroleka к рассогласованию метеоданных об осадках за период основных выпадений и ин-

струментальных данных о плотностях выпадения цезия с результатами их модельной реконструкции.

**Цель исследования** – для устранения этих расхождений на основе инструментальных данных «Варшавского» сценария выполнить исследование по применению моделей однородного облака – неоднородных осадков и неоднородного облака – однородных осадков к описанию процесса формирования радиоактивного загрязнения территории Warsaw Area и Ostroleka Area (Мазовия, Польша) после аварии на ЧАЭС с учетом измерений концентраций радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере в районе г. Варшавы.

### Материалы и методы

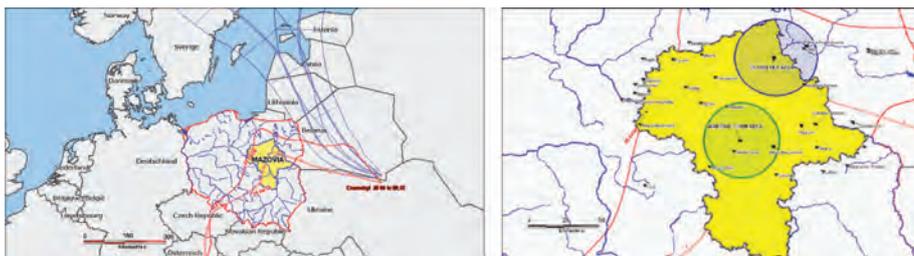
В качестве исходных данных использовали данные мониторинга о плотностях выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в населенных пунктах Warsaw и Ostroleka районов Мазовии и данные о количестве осадков с метеостанций этих районов. Для реконструкции концентрации радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере над двумя молочными районами Мазовии использовали результаты атмосферных измерений в г. Варшава.

Исследования и анализ инструментальных данных проводились с использованием имитационной агро радиозоологической модели [7].

### Результаты и обсуждение

Инструментальные данные плотностей выпадения  $^{137}\text{Cs}$  в Warsaw Area указывают на их относительную пространственную однородность, в пределах  $1,3\text{--}8,0$  кБк/м<sup>2</sup>, за исключением двух пятен повышенного загрязнения ( $22,7$  и  $10,8$  кБк/м<sup>2</sup>), где были локальные осадки 30 апреля 1986 г. В Ostroleka Area осадков в дни радиоактивных выпадений 29, 30 апреля 1986 г., по данным всех трех метеостанций, на его территории не было. Плотность выпадения  $^{137}\text{Cs}$  здесь была близка к значению «сухих» выпадений на территориях вокруг г. Варшавы (около  $4\text{--}5$  кБк/м<sup>2</sup>). Местами на территории Мазовии прошли небольшие локальные дожди, не оказавшие значимого влияния на выпадения радиоактивных продуктов аварии на ЧАЭС.

В «Варшавском» сценарии приведена информация о плотностях выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в 27 населенных пунктах (НП) центральной части Мазовии, о координатах расположения метеостанций и метеопостов и зарегистрированных там осадках; о минимальных, максимальных и средних плотностях выпадений  $^{137}\text{Cs}$  во всех округах районов



**Рис. 1.** Локализация провинции Мазовия в Европе и молочных районов Warsaw area и Ostroleka area в Мазовии  
**[Fig. 1.** Location of the Mazovia province in Europe, and milk Warsaw area and Ostroleka area in the Mazovia province]

Warsaw и Ostoleka (молочный район состоит из молочных округов – аналогов территорий выпаса молочных ферм, включая расположенные там населенные пункты).

Отметим следующие основные особенности, полученные в результате обработки исходных данных, которые оказались одинаковыми для населенных пунктов и молочных округов:

- незначительные (в пределах 30%) различия в средних плотностях выпадения  $^{137}\text{Cs}$  в молочных районах;

- плотность «сухих» выпадений  $^{137}\text{Cs}$ , оцененная по модели прямого расчета с инструментальными данными его активности в атмосфере ( $1,28 \text{ kBq/m}^2$ ), в пределах 10–35% совпадает с фактическими минимальными плотностями выпадений в районах Warsaw и других районов за пределами Warsaw и Ostoleka, и на 25% отличается от средних минимальных плотностей в этих районах;

- в населенных пунктах Ostroleka Area минимальная плотность выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в НП превышает расчётную плотность «сухих» выпадений в 2,7 раза, а в молочных округах – в 1,7 раза;

- разброс отношений максимальных к минимальным плотностям выпадения  $^{137}\text{Cs}$  в Warsaw Area весьма значителен и равен 17,7 раза для населенных пунктов и 10,7 раза для округов, для Ostoleka Area разброс этих отношений существенно меньше и равен 2,1 раза для населенных пунктов и 3,25 раза для молочных округов;

- по метеоданным 9 метеостанций и метеопостов, в молочном районе Warsaw Area разброс осадков за период основных выпадения, составил от 0 мм до 7–10 мм, в молочном районе Ostoleka Area, по метеоданным 3 метеостанций, осадков за этот же период времени не было.

Из этого можно сделать следующие выводы:

- существенная вариабельность плотностей выпадения  $^{137}\text{Cs}$  в молочном районе Warsaw Area и наличие осадков, зафиксированных на метеостанциях в период основных радиоактивных выпадений, дают дополнительные основания для предпочтительного использования модели однородного облака – неоднородных осадков над

всем этим районом для всех населенных пунктов и молочных округов этого района;

- в молочном районе Ostoleka Area, в котором не проводились измерения в атмосфере и не были зафиксированы осадки в период основных выпадений, минимальная измеренная плотность выпадений  $^{137}\text{Cs}$  оказалась более чем в 2 раза больше плотности «сухих» выпадений, реконструированных по агроклиматической модели [7] с использованием измерений удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере в районе Варшавы;

- такое расхождение с учетом отсутствия осадков в период радиоактивных выпадений послужило основанием для предположения о том, что, несмотря на малые размеры обоих районов и расстояний между ними по сравнению с расстоянием от этих районов до Чернобыльской АЭС, активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере Ostroleka Area были в 2–3 больше, чем в Warsaw Area. Это может быть объяснено как динамикой прохождения радиоактивного облака через территорию Мазовии (сначала над районом Ostroleka Area, а затем над районом Warsaw Area), так и различиями в расстояниях этих районов от оси радиоактивного следа, а также пространственной неоднородностью облака, обусловленной турбулентными процессами в атмосфере;

- после введения такой корректировки для Ostroleka Area степень согласия входных данных имитационной модели с измерениями становится такой же, как и для Warsaw Area. Однако, с учетом отсутствия осадков на всех его метеостанциях в период радиоактивных выпадений и сравнительно малого разброса плотностей выпадений  $^{137}\text{Cs}$ , предполагается в качестве еще одного варианта модель неоднородного облака с «сухими» выпадениями на всей территории этого района.

В таблице и на рисунке 2 представлены варианты наборов входных данных моделей активностей  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере на примере населенного пункта Ostroleka (метеостанция – Ostroleka, район Ostroleka Area).

Данные таблицы показывают, что в варианте с инструментальными данными динамики активности  $^{137}\text{Cs}$

Таблица

Параметры входных данных для района Ostroleka

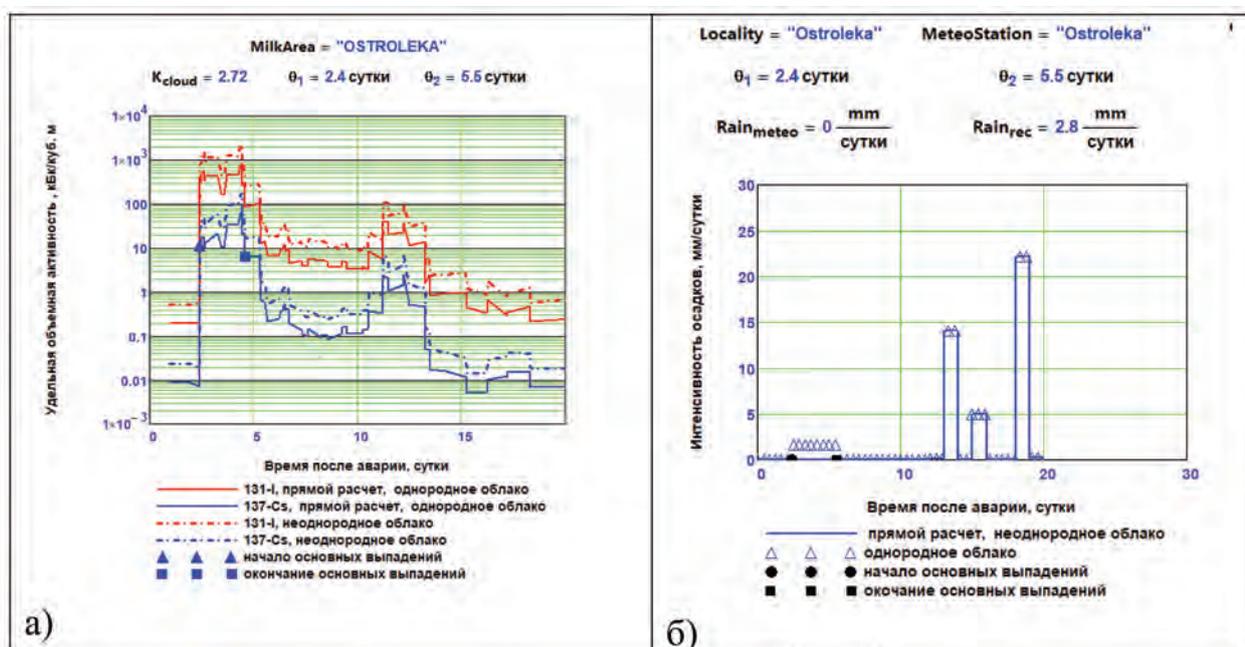
[Table

[Input parameters for Ostroleka Area]

Параметр [parameter]	Прямые данные активности $^{137}\text{Cs}$ в атмосфере, $k_{\text{cloud0}}=1,1$ [Direct data on the $^{137}\text{Cs}$ activity in the atmosphere, $k_{\text{cloud0}}=1,1$ ]			Пересчитанные данные активности $^{137}\text{Cs}$ в атмосфере, $k_{\text{cloud0}}=1,72$ [Recalculated data of $^{137}\text{Cs}$ activity in the atmosphere, $k_{\text{cloud0}}=1,72$ ]		
	прямой расчет [direct calculation]	неоднородное облако [heterogeneous cloud]	однородное облако [homogeneous cloud]	прямой расчет [direct calculation]	неоднородное облако [heterogeneous cloud]	однородное облако [homogeneous cloud]
$\sigma\text{Cs}_{\text{dep}}^*$ , $\text{kBq/m}^2$ [ $\sigma\text{Cs}_{\text{dep}}^*$ , $\text{kBq/m}^2$ ]				3,1		
$\text{Rain}_{\text{meteo}}^*$ , мм/сутки [ $\text{Rain}_{\text{meteo}}^*$ , mm/day]				0		
$k_{\text{cloud}}$	1	2,72	1	1	1,6	1
$\sigma\text{Cs}_{\text{rec}}^*$ , $\text{kBq/m}^2$ [ $\sigma\text{Cs}_{\text{rec}}^*$ , $\text{kBq/m}^2$ ]	1,2	3,1	3,1	2,0	3,1	3,1

Параметр [parameter]	Прямые данные активности $^{137}\text{Cs}$ в атмосфере, $k_{\text{cloud0}}=1,1$ [Direct data on the $^{137}\text{Cs}$ activity in the atmosphere, $k_{\text{cloud0}}=1,1$ ]			Пересчитанные данные активности $^{137}\text{Cs}$ в атмосфере, $k_{\text{cloud0}}=1,72$ [Recalculated data of $^{137}\text{Cs}$ activity in the atmosphere, $k_{\text{cloud0}}=1,72$ ]		
	прямой расчет [direct calculation]	неоднородное облако [heterogeneous cloud]	однородное облако [homogeneous cloud]	прямой расчет [direct calculation]	неоднородное облако [heterogeneous cloud]	однородное облако [homogeneous cloud]
$\text{Rain}_{\text{rec}}$ , мм/сутки [ $\text{Rain}_{\text{rec}}$ , mm/day]	0	0	2,8	0	0	0,7

$k_{\text{cloud0}}$  и  $k_{\text{cloud}}$  – коэффициенты пересчета удельных активностей  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере района Ostroleka Area и населенного пункта Ostroleka;  
 $\sigma\text{Cs}_{\text{dep}}$ ,  $\sigma\text{Cs}_{\text{rec}}$  – плотности выпадения  $^{137}\text{Cs}$  соответственно, инструментальные и реконструированные по модели прямого расчета,  $\text{кБк}/\text{м}^2$ ;  
 $\text{Rain}_{\text{meteo}}$  и  $\text{Rain}_{\text{rec}}$  – осадки по метеоданным и реконструированные по модели неоднородного облака, мм;  
 $(\theta_1; \theta_2)$  – время основных выпадений, сутки после аварии.



**Рис. 2.** Удельные объемные активности  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере района Ostroleka Area (а) и интенсивность осадков на метеостанции Ostroleka (б)  
**[Fig. 2.** The specific volumetric activity of  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the atmosphere of the Ostroleka Area (a) and the intensity of precipitation at the Ostroleka weather station (b)]

в атмосфере ( $k_{\text{cloud0}}=1$ ) при прямом расчете с метеоданными об отсутствии осадков за период основных выпадений ( $\text{Rain}_{\text{meteo}}=0$  мм/сутки) фактическая и расчетная плотности «сухих» выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в этом НП, равные  $3,1 \text{кБк}/\text{м}^2$  и  $1,2 \text{кБк}/\text{м}^2$  соответственно, отличаются в 2,7 раза ( $k_{\text{cloud}}=2.72$ , см. рис. 2).

В модели неоднородного облака взаимное согласование всех трех типов данных: активностей  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере, осадков за период основных выпадения и плотностей выпадения  $^{137}\text{Cs}$  производится путем увеличения активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере на эту же величину (см. рис. 2а); в модели однородного облака – путем увеличения интенсивности эффективных осадков за период  $(\theta_1; \theta_2)$  до  $2,8$  мм/сутки (см. рис. 2б).

В варианте с пересчетом активностей  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере ( $k_{\text{cloud0}}=1,74$ ) произведена нормировка плотности «сухих» выпадений  $^{137}\text{Cs}$  при прямых данных его активности в атмосфере ( $k_{\text{cloud}}=1$ ) на минимальную плотность выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в районе Ostroleka Area, равную  $2 \text{кБк}/\text{м}^2$ . В этом варианте для модели прямого расчета плотность сухих выпадений  $^{137}\text{Cs}$  увеличилась до  $2 \text{кБк}/\text{м}^2$ , коэффициент пересчета активностей  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере для модели неоднородного облака уменьшился до  $1,6$ , а осадки для модели однородного облака уменьшились до незначимой величины  $0,7$  мм/сутки (см. табл.). Стандартное геометрическое отклонение невязок во всех вариантах расчетов равно  $1,49-1,51$ .

Все три варианта параметров моделей атмосферы будут использоваться в следующих работах по исследованиям динамики активностей <sup>131</sup>I сначала в зеленом корме молочных коров и далее, уже с использованием их результатов, в молоке.

**Заключение**

Анализ базы инструментальных и реконструированных по радиоэкологической модели данных «Варшавского» сценария выполнен на основе предположения, что измеренные минимальные плотности выпадений цезия в каждом молочном районе соответствуют сухим выпадениям. Это предположение подтверждается совпадением расчетных и измеренных плотностей выпадения <sup>137</sup>Cs с точностью до 10% на территории района Warsaw Area, где в период основных выпадений, по метеоданным, прошли локальные осадки. В районе Ostoleka Area, где не проводились измерения параметров радиоактивного загрязнения атмосферы и не было осадков за период основных выпадений, плотности сухих выпадений <sup>137</sup>Cs, рассчитанные, как и в районе Warsaw Area, по модели однородного облака, оказались в 2,7 раза меньше измеренных минимальных плотностей выпадений. При использовании модели неоднородного облака расчетные и измеренные минимальные плотности выпадений совпадали с такой же точностью, как и в районе Warsaw Area. Выполненная процедура взаимного согласования входных реконструированных и инструментальных данных предназначена для расчета транспорта радионуклидов <sup>131</sup>I, <sup>134</sup>Cs и <sup>137</sup>Cs в конечных элементах пищевой цепочки – в молоке и в организме человека.

**Приложение**

*Модели атмосферы*

**Регион** – часть территории, на которой были получены инструментальные данные динамики активностей радионуклидов в атмосфере.

**Прямой расчет:** для всех НП региона используется следующий набор входных данных: инструментальные данные динамики активности радионуклидов <sup>137</sup>Cs, <sup>131</sup>I и химических форм его существования в атмосфере, метеоданные об осадках за период основных выпадений на ближайших к НП метеостанциях. По ним рассчитывается плотность выпадения <sup>137</sup>Cs.

**Однородное облако – неоднородные осадки:** одинаковая удельная объемная активность радионуклидов в атмосфере над регионом – неоднородные эффективные осадки в населенных пунктах (НП) (осадки с постоянной интенсивностью в период основных выпадений, реконструированные по инструментальным данным активности <sup>137</sup>Cs в атмосфере и плотностям его выпадения в НП).

**Неоднородное облако – однородные осадки:** регион неоднородного облака включает все населенные пункты вокруг ближайшей к ним метеостанции для каждого НП региона – данные этой метеостанции об осадках за период основных выпадений, динамика удельных активностей радионуклидов в атмосфере над каждым НП нормируется на плотность выпадения <sup>137</sup>Cs по соотношению:

$$C_{rec}^{nucl}(t) = C_{instr}^{nucl}(t) * \frac{\sigma_{НП}^{137Cs}}{\sigma_{rec}^{137Cs}}, \quad (1)$$

где:  $C_{rec}^{nucl}(t)$  и  $C_{instr}^{nucl}(t)$  – реконструированная и инструментальная зависимость от времени активности радионуклидов <sup>137</sup>Cs в атмосфере, кБк/м<sup>3</sup>,

$\sigma_{НП}^{137Cs}$ ,  $\sigma_{rec}^{137Cs}$  – фактическая и реконструированная плотность выпадения <sup>137</sup>Cs в населенном пункте, кБк/м<sup>2</sup>, здесь:

$$\sigma_{rec}^{137Cs} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} [V_{ds}^{Cs} + \dot{R}_{НП}^{meteo}(\tau) * W^{Cs}] * C_{instr}^{137Cs}(\tau) * d\tau, \quad (2)$$

$\theta_1 \div \theta_2$  – время основных выпадений, сутки после аварии,

$V_{ds}^{Cs}$  – скорость «сухого» выпадения цезия на почву, 0,5 мм/с, [8]

$\dot{R}_{dep}$  – интенсивность дождя в период основных выпадений, м/сутки,

$W^{Cs}$  – коэффициент объемного вымывания Cs из атмосферы дождем, равный отношению объемных активностей радионуклида в дождевой воде и воздухе, (1·10<sup>5</sup>) [8].

*Коэффициент пересчета удельных объемных активностей <sup>137</sup>Cs и <sup>131</sup>I в атмосфере*

Коэффициент пересчета удельных объемных активностей <sup>137</sup>Cs и <sup>131</sup>I в атмосфере от инструментальных данных в регионе их измерения (индекс <sub>o</sub>) к реконструированным данным в регионе без их измерений (индекс <sub>k</sub>).

**Вариант 1**, с использованием реконструированных плотностей «сухих» выпадений <sup>137</sup>Cs, рассчитанных по инструментальным данным его удельной активности в атмосфере

$$k_{cloud,k}^{Cs,I} = \frac{\sigma_{min,k}^{137Cs}}{\sigma_{dry,0}^{137Cs}}, \quad (3)$$

где:

$$\sigma_{dry,0}^{137Cs} = V_{ds}^{Cs} * \int_{\theta_1}^{\theta_2} C_{instr,0}^{137Cs}(\tau) * d\tau, \quad (4)$$

**Вариант 2**, с использованием минимальных плотностей выпадения <sup>137</sup>Cs в регионах

$$k_{cloud,k}^{Cs,I} = \frac{\sigma_{min,k}^{137Cs}}{\sigma_{dry,rec,0}^{137Cs}}, \quad (5)$$

где:  $\sigma_{min,k}^{137Cs}$  – минимальная плотность выпадения <sup>137</sup>Cs в к-м регионе, кБк/м<sup>2</sup>;

$$\sigma_{dry,rec,0}^{137Cs} = V_{ds}^{Cs} * \int_{\theta_1}^{\theta_2} C_{instr,rec,0}^{137Cs}(\tau) * d\tau. \quad (6)$$

В формуле (6):  $C_{instr,rec,0}^{137Cs}$  – удельная объемная активность <sup>137</sup>Cs в атмосфере 0-го региона, нормированная на плотность его реконструированных «сухих» выпадений в этом же регионе, кБк/м<sup>3</sup>, определяется выражением:

$$C_{instr,rec,0}^{137Cs}(t) = \frac{\sigma_{min,0}^{137Cs}}{\sigma_{dry,0}^{137Cs}} * C_{instr,0}^{137Cs}(t), \quad (7)$$

где:  $\sigma_{dry,0}^{137Cs}$  – плотность «сухих» выпадений <sup>137</sup>Cs в 0-вом регионе, кБк/м<sup>2</sup>, рассчитанная по инструментальным данным удельной активности <sup>137</sup>Cs в атмосфере.

С учетом (4–7), получаем:

$$k_{cloud,k}^{Cs,I} = \frac{\sigma_{min,k}^{137Cs}}{\frac{\sigma_{min,0}^{137Cs}}{\sigma_{dry,0}^{137Cs}} * [V_{ds}^{Cs} * \int_{\theta_1}^{\theta_2} C_{instr,0}^{137Cs}(\tau) * d\tau] = \sigma_{dry,0}^{137Cs}} = \frac{\sigma_{min,k}^{137Cs}}{\sigma_{min,0}^{137Cs}}. \quad (8)$$

Пространственно-однородные удельные объемные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  в атмосфере k-го региона ( $C_{rec,k}^{137\text{Cs}, 131\text{I}}$ ) рассчитываются по соотношению

$$C_{rec,k}^{137\text{Cs}, 131\text{I}}(t) = C_{instr,0}^{137\text{Cs}, 131\text{I}}(t) * k_{cloud,k}, \quad (9)$$

где:  $C_{instr,0}^{137\text{Cs}, 131\text{I}}$  – данные удельных объемных активностей  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{131}\text{I}$  в атмосфере, измеренные в 0-м регионе, кБк/м<sup>3</sup>.

### Литература

1. Власов О.К., Краевский П., Бартускова М., и др. Создание и верификация взаимосогласованной базы входной информации имитационной модели транспорта радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$  по пищевой цепочке на инструментальных радиоэкологических данных (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS) // Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 3. С. 5-26.
2. Власов О.К., Краевский П., Звонова И.А., и др. Верификация радиоэкологической модели на инструментальных данных удельной активности  $^{131}\text{I}$  в траве в Мазовии и Богемии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS) // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 6-17.
3. Vlasov O.K., Krajewski P., Bartuskova M., et al. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS): a summary report of the results of the EMRAS programme (2003-2007). IAEA-TECDOC-1678. Vienna, IAEA; 2012. 60 p.
4. Krajewski P., Ammann M., Bartusková M., et al. Validation of environmental transfer models and assessment of the effectiveness of countermeasures using data on  $^{131}\text{I}$  releases from Chernobyl // Appl Radiat Isot. 2008. Vol. 66, No 11. P. 1730-5.
5. Bartuskova M., Malatova I., Berkovskyy V., et al. Radioecological assessments of the Iodine working group of IAEA's EMRAS programme: Presentation of input data and analysis of results of the Prague scenario // Radioprotection. 2009. Vol. 44, No. 5. P. 295-300.
6. Zvonova I., Berkovsky V., Ammann M., et al. Validation of  $^{131}\text{I}$  ecological transfer models and thyroid dose // J. Environ. Radioact. 2010. Vol. 101, N 1. P. 8–15. DOI:10.1016/j.jenvrad.2009.08.005.
7. Власов О.К. Радиоэкологическая модель транспорта радионуклидов йода и цезия по пищевым цепочкам после радиационных аварий с выбросом в атмосферу для исследований закономерностей формирования доз внутреннего облучения населения. Часть 1. Описание, постановка и свойства агроклиматического блока модели // Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 2. С. 16-34.
8. Muller H., Prohl G. ECOSYS for Excel (version 1.4E). A radioecological model for assessing contamination of foodstuffs and radiation exposure following a release of radionuclides. ConRad Consulting in Radioecology, Schumann str. 12, D-85598, Baldham.

Поступила: 03.07.2020 г.

**Власов Олег Константинович** – заведующий лабораторией радиационно-экологической информатики, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 249036, Калужская область, г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4; E-mail: vlasov@nrcg.ru

**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

**Краевский Павел** – профессор, директор Центральной лаборатории радиационной защиты, Варшава, Польша

**Щукина Наталия Владиленовна** – старший научный сотрудник лаборатории радиационно-экологической информатики, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

**Чекин Сергей Юрьевич** – заведующий лабораторией оптимизации радиологической защиты, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

**Туманов Константин Александрович** – заведующий лабораторией научно-методического сопровождения радиологических регистров и банков данных, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

**Для цитирования:** Власов О.К., Звонова И.А., Краевский П., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А. Реконструкция параметров радиоэкологической модели по результатам мониторинга радиационной обстановки в Мазовии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Варшавского» сценария проекта МАГАТЭ EMRAS) // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 26-33. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-26-33

## Reconstruction of radio-ecological model parameters based on the results of monitoring the radiation situation in Mazovia after the Chernobyl accident (based on the «Warsaw» scenario of the IAEA EMRAS project)

Oleg K. Vlasov<sup>1</sup>, Irina A. Zvonova<sup>2</sup>, Pavel Krajewski<sup>3</sup>, Nataliya V. Schukina<sup>1</sup>, Sergey Yu. Chekin<sup>1</sup>, Konstantin A. Tumanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Central Laboratory for Radiological Protection, Warsaw, Poland

*The paper analyzes the consistency of the input data of the radioecological model: the results of measurements of <sup>137</sup>Cs and <sup>131</sup>I concentrations in the atmosphere after the Chernobyl accident in Warsaw, the meteorological data on precipitation during the main radioactive fallout, the values of minimum <sup>137</sup>Cs deposition densities on the territories of two dairy areas of Warsaw Area and Ostroleka Area in the central part of Mazovia. According to meteorological data in Warsaw Area during the period of radioactive fallout there were local rains. In Ostroleka Area, according to all weather stations, there was no rainfall during this period. In Warsaw Area, a minimum <sup>137</sup>Cs deposition density of 1.3 kBq/m<sup>2</sup> with an error of less than 10% was found to be consistent with the “dry” deposition density of <sup>137</sup>Cs (1.2 kBq/m<sup>2</sup>) reconstructed by a simulated agroclimatic model based on atmospheric <sup>137</sup>Cs measurements. This agreement, taking into account the amount of precipitation recorded at weather stations during the period of radioactive fallout and the significant, more than 10 times, dispersion of <sup>137</sup>Cs fallout densities across the Warsaw Area, suggests that a homogeneous cloud-uniform fallout model is preferable for this region in radio-ecological modeling. For the Ostroleka Area, the variation in deposition densities of <sup>137</sup>Cs was relatively small, at 3.2, and the estimated dry deposition density of <sup>137</sup>Cs was 2.0–2.7 times lower than the measured minimum deposition densities in districts and settlements. This discrepancy, given the absence of precipitation recorded by all weather stations during the deposition period, led to the assumption that the <sup>137</sup>Cs and <sup>131</sup>I atmospheric concentrations in Ostroleka Area were 2–2.7 times higher than those in Warsaw Area. The adjustment of the <sup>137</sup>Cs and <sup>131</sup>I atmospheric concentrations in the Ostroleka Area for this region will be verified by measuring the <sup>131</sup>I specific activity in milk under the Warsaw scenario.*

**Key words:** Chernobyl accident, IAEA project “EMRASS”, “Warsaw” scenario; simulation agro-radio-ecological model, <sup>137</sup>Cs and <sup>131</sup>I at the atmosphere, dry and wet depositions, “dry” and “wet” deposition, <sup>137</sup>Cs deposition density.

### References

- Vlasov OK, Krajewski P, Bartuskova M, Malatova I, Shchukina NV, Chekin SYu, et al. The creation and verification of a mutually agreed database of input information of the simulation model of transport of radionuclides <sup>137</sup>Cs and <sup>131</sup>I along the food chain on instrumental radioecological data (based on the materials of the “Prague” and “Warsaw” scenarios of the IAEA EMRAS project). *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2019;28(3): 5-23 (In Russian)
- Vlasov OK, Krajewski P, Zvonova IA, Malatova I, Bartuskova M, Schukina NV, et al. Verification of radioecological models to the instrumental data of the specific activity <sup>131</sup>I in a grass in Mazovia and Bohemia after the Chernobyl accident (from “Prague” and “Warsaw” scenarios of the IAEA project EMRAS). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 6-17 (In Russian)
- Vlasov OK, Krajewski P, Bartuskova M, Malatova I, Schukina NV, Chekin SYu, et al. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS): a summary report of the results of the EMRAS programme (2003-2007). IAEA-TECDOC-1678. Vienna, IAEA. 2012. 60 p.
- Krajewski P, Ammann M, Bartusková M, Duffa C, Filistovic V, Homma T, et al. Validation of environmental transfer models and assessment of the effectiveness of countermeasures using data on <sup>131</sup>I releases from Chernobyl. *Applied Radiation and Isotopes*. 2008;66(11): 1730-5.
- Bartuskova M, Malatova I, Berkovskyy V, Krajewski P, Amman M, Filistovic V, et al. Radioecological assessments of the Iodine working group of IAEA's EMRAS programme: Presentation of input data and analysis of results of the Prague scenario. *Radioprotection* 2009;44(5): 295-300.
- Zvonova I, Berkovsky V, Ammann M, Duffa C, Filistovic V, Homma T, et al. Validation of <sup>131</sup>I ecological transfer models and thyroid dose. *Journal of Environmental Radioactivity* 2010;101(1): 8–15. DOI:10.1016/j.jenvrad.2009.08.005.
- Vlasov OK. Radioecological model for transport of radioiodine and radiocesium in the food chains after radiological accidents and discharge of radioactive substances to atmosphere for study of mechanism of formation of internal radiation doses to population. Part 1. Description, formulation and properties of agroclimatic model. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2013;22(2): 16-34 (In Russian)
- Muller H, Prohl G. ECOSYS for Excel (version 1.4E). A radio-ecological model for assessing contamination of foodstuffs and radiation exposure following a release of radionuclides. ConRad Consulting in Radioecology, Schumann str. 12, D-85598, Baldham.

Received: July 03, 2020

**Oleg K. Vlasov**

A. Tsyb Medical Radiological Research Center

**Address for correspondence:** Koroleva str., 4, Obninsk, 249036, Kaluga region, Russia; E-mail: vlasov@nrer.ru

**For correspondence: Oleg K. Vlasov** – Head of the Laboratory of Radiation-environmental Informatics, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation (Koroleva str., 4, Obninsk, 249036, Kaluga region, Russia; E-mail: vlasov@nrer.ru)

**Irina A. Zvonova** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, 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

**Pavel Krajewski** – Professor, Director of the Central Laboratory of Radiological Protection, Warsaw, Poland

**Nataliya V. Schukina** – Senior Researcher of the Laboratory of Radiation-Environmental Informatics, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

**Sergey Yu. Chekin** – Head of the Laboratory of Optimization of Radiological Protection, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

**Konstantin A. Tumanov** – Head of the Laboratory of Scientific-methodical Maintenance of Radiological Registers and Data Banks, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

**For citation: Vlasov O.K., Zvonova I.A., Krajewski P., Schukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A. Reconstruction of radio-ecological model parameters based on the results of monitoring the radiation situation in Mazovia after the Chernobyl accident (based on the “Warsaw” scenario of the IAEA EMRAS project). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 4. P. 26-33. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-26-33**

## Специфика формирования родительских групп животных при определении влияния малых доз радиации на когнитивные функции потомства

В.В. Панфилова, О.И. Колганова, О.Ф. Чибисова, Л.П. Жаворонков

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал «Национального медицинского исследовательского центра радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

*Целью работы было исследование способности к обучению потомства облученных в дозе 0,5 Гр самцов крыс. Когнитивные функции мозга оценивали по способности к выработке и воспроизведению условного рефлекса активного избегания. Установлено, что исходное состояние когнитивных функций мозга родителей влияет на развитие этих функций у потомства. Учет данного фактора позволит избежать методических ошибок, заключающихся в случайном формировании групп, неравноценных по исходным психофизиологическим параметрам. Целесообразность подобного ранее не применявшегося подхода продемонстрирована на модели облучения в малой дозе (0,5 Гр) половых клеток самцов. Установлено, что выраженность радиационного эффекта по данному критерию может существенно изменяться при разных подходах к формированию групп родителей.*

**Ключевые слова:** крысы, когнитивные функции мозга, способность к обучению, ионизирующее излучение, челночная камера.

### Введение

В рекомендациях Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) существует понятие «критические органы». Это органы, облучение которых причиняет наибольший вред живому организму. К числу этих органов относятся гонады, т.к. при их облучении возможно повреждение генетических структур, ответственных за передачу наследственной информации [1, 2]. По современным нормам для наследственных заболеваний вероятность развития зависит от дозы. Риск стохастических эффектов в диапазоне малых доз линейно зависит от дозы, а порог дозы при этом отсутствует [3]. Изначально основной идеей нашей работы было определение влияния облучения родителей на когнитивные функции мозга их потомства. В научной литературе имеющаяся информация по данной тематике противоречива. Есть работы, которые показывают негативные эффекты воздействия ионизирующего излучения: снижение двигательной активности у лабораторных животных, нарушение поведения, отклонения в мозговой деятельности и др. [4–7]. Однако есть работы, показывающие отсутствие влияния облучения на выработку и воспроизведение условно-оборонительного рефлекса пассивного избегания у крыс [8]. Также обследование детей и внуков работников радиохимического предприятия в России не выявило существенных нарушений в их развитии [9]. Обобщая рассмотренные выше данные научной литературы, можно заключить, что в результате многолетних исследований различными

учеными выявлены определенные отклонения в психофизиологическом статусе потомков облученных родителей.

**Цель исследования** – проследить в опытах на крысах, каким образом отражается воздействие гамма-облучения самцов-родителей в дозе 0,5 Гр на когнитивных функциях потомства.

Выявить отклонения в когнитивных функциях мозга потомства облученных родителей, вызванные именно воздействием радиации, довольно сложно, т.к. на эффекты радиации часто накладывается влияние и других факторов, в частности, исходного интеллектуального уровня родителей. Известно, что умственные способности передаются по наследству [10]. Однако не ясно, отражаются ли различия в способности к обучению родителей на когнитивных функциях мозга их потомства.

### Задачи исследования

1. Определить, каким образом воздействие ионизирующего излучения в малых дозах может отразиться на когнитивных функциях потомства.
2. Определить вклад фактора исходного интеллектуального уровня родителей, мешающего определению радиационного эффекта.
3. Узнать, как следует формировать группы тестируемых животных, чтобы выявить изменения в когнитивных функциях мозга, вызванные именно влиянием ионизирующего излучения, а не иными факторами.

**Панфилова Виктория Викторовна**

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал «Национального медицинского исследовательского центра радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации

**Адрес для переписки:** 249036, Калужская область, г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4; E-mail: whiskas04@yandex.ru

### Материалы и методы

Объектом исследования явились самцы крыс линии Вистар и их потомство первого поколения. Для решения поставленных задач половозрелых самцов крыс линии Вистар ( $F_0$ ) облучали на гамма-установке «Луч» ( $^{60}\text{Co}$ ) при мощности дозы 20,0 Гр/ч, в дозе 0,5 Гр. Затем их спаривали с интактными самками через разные интервалы времени после облучения (чтобы в оплодотворении участвовали половые клетки, облученные на разных стадиях сперматогенеза), исходя из цикла сперматогенного эпителия.

В группы для дальнейшего тестирования условно-рефлекторной деятельности в месячном возрасте отбирали по два внешне здоровых детеныша от каждой самки-матери и дорастивали их до трехмесячного возраста. Контрольную группу составляли интактные самцы и самки, которые находились в идентичных с подопытными крысами условиях содержания. Животных содержали в стандартных условиях вивария МРНЦ им. А.Ф. Цыба, на рационе, состоящем преимущественно из брикетированного корма.

Когнитивные функции мозга оценивали по способности к выработке и воспроизведению условного рефлекса активного избегания (УРИ). В экспериментах использовали стандартную методику обучения крыс в челночной камере Шаттл-бокс [11]. Установка состоит из двух отделений, разделенных перегородкой, в которой имеется отверстие. Оба отделения имеют отдельно электрифицированный пол. Условным раздражителем является свет и звук, которые предъявляются за 4 с до безусловного раздражителя, которым является электроболевое раздражение (с 4 по 12 с), подаваемое через электродный пол поочередно то в одном, то в другом отделении. Чтобы не получить болевого раздражения, животное должно обучиться перебежать из одного отсека камеры в другой во время действия условного сигнала (условный рефлекс). Перебегание в другой отсек в ответ на действие болевого раздражителя является безусловным рефлексом. Данный метод позволяет судить о таких элементах высшей нервной деятельности, как ассоциативное мышление, память, закрепление условных связей и воспроизведение выработанного навыка. В камеру для тестирования каждое животное помещается отдельно. Каждому животному предъявляется 50 сочетаний условного и безусловного раздражителей в каждом тестировании. Животных тестировали 2 раза с интервалом в 2 суток.

При анализе выработки и воспроизведения УРИ использовали ряд показателей, отражающих конечную результативность либо характеризующих скорость обучения.

К интегративным критериям относили:

- 1) число нанесённых током ударов до регистрации первого УРИ – лаг-фаза обучения;
- 2) общее число УРИ за сессию, из них быстрых – латентный период до 2,5 с;
- 3) число отказов (отсутствие перебежек даже на электрокожное подкрепление);
- 4) наличие крыс, имеющих серии из пяти и более УРИ подряд (критерий оценки состояния консолидации памятного следа).

Показатели скорости обучения (динамические критерии) основаны на оценке параметров кривых линейной

регрессии, отражающих нарастание частоты избеганий в процессе обучения. При многократных испытаниях регрессионный анализ позволяет количественно оценить различия в исходном уровне обученности и скорости обучения (по коэффициентам уравнений регрессии). С помощью уравнений линейной регрессии оценивали:

1) динамику количества УРИ в процентах к максимально возможному за интервал в 10 попыток с шагом в 2 попытки индивидуально по каждой крысе и в целом по группе (используется при построении уравнения регрессии);

2) при использовании в качестве функции отношения числа УРИ к числу совершённых попыток (%) вычисляли также критерий 50% обученности (ОБ-50) с доверительным интервалом (число попыток до появления 50% УРИ в среднем у каждой крысы по группе).

### Результаты и обсуждение

Задуматься над вопросом о важности формирования равноценных родительских групп по признаку обучаемости нас побудили результаты эксперимента по выявлению влияния на когнитивные функции потомства облучения самцов крыс в дозе 0,5 Гр, гаметы которых подверглись облучению на стадии сперматогоний. При тестировании потомков в первой серии опытов, когда родительские группы были подобраны случайным образом без предварительной оценки их способностей к обучению, были получены настолько высоко достоверные различия между контрольными и подопытными животными (табл. 1), что не согласовывалось с нашими предыдущими работами [12]. Это потребовало подтверждения и привело к постановке второй серии опытов, в которой группы родителей были сформированы с учетом уровня развития когнитивных способностей. При экспериментальном исследовании эффектов радиации на высшую нервную деятельность (ВНД) потомков облученных животных-родителей особенно важно подобрать исходно равноценные группы родителей по их способности к обучению. Как известно, способность к обучению и другие параметры ВНД могут передаваться по наследству [13]. На основании этого нами была выдвинута гипотеза, заключающаяся в том, что если случайно в группу «контроля» попадут потомки только от «умных» родителей, а в группу «опыта» – только от «глупых» родителей-животных (или наоборот), то получившуюся достоверную разницу между двумя группами животных можно ошибочно принять за эффект радиационного воздействия. Особенно это важно при исследовании влияния малых доз радиации.

Как видно из таблицы 1, статистически значимые различия в первой серии опытов наблюдаются по всем интегративным показателям (лаг-фаза отражает количество предъявлений условного и безусловного раздражителей до первого успешно выполненного УРИ). То есть мы наблюдали сниженную способность к обучению у группы «Сперматогонии» по сравнению с контролем. Во второй серии опытов при равноценных родительских группах (одинаков и качественный, и количественный состав) потомки первого поколения из контрольной и опытной групп не различались по показателям обучаемости.

Исходя из полученных результатов в опыте с облучением половых клеток на стадии сперматогоний, было решено в двух повторностях на стадии сперматид сформировать группы родителей в соответствии с уровнем развития когнитивных способностей.

Таблица 1  
Влияние облучения сперматогониев родителей-крыс в дозе 0,5 Гр на условно-рефлекторную деятельность потомства  
[Table 1  
Effect of irradiation of spermatogonies of rat parents at a dose of 0.5 Gy on the conditioned reflex activity of offspring]

Группа (количество животных) [Group (number of animals)]	Лag-фаза [Lag-phase]	Общее количество УРИ [General the number of URI]	Количество Отказов [The number of failures]
I серия опытов [I a series of experiments]			
«Контроль» (n=17) [«Control»(n=17)]	3,3± 0,7	29,6± 2,7	1,0± 0,4
«Сперматогонии» (n=19) [«Spermatogonia»(n=19)]	12,8*± 3,8	13,8 *± 3,1	9,9 *± 2,1
II серия опытов [II a series of experiments]			
«Контроль» (n=33) [«Control»(n=33)]	7,7± 1,9	26,9± 2,7	2,4± 0,9
«Сперматогонии» (n=30) [«Spermatogonia»(n=30)]	11,1± 2,7	21,1± 2,5	1,2± 0,3

\* – статистически значимое различие с контролем при p<0,05 [\* – statistically significant difference with the control at p<0,05].

Чтобы оценить, насколько способности к обучению у родителей-крыс могут повлиять на способности к обучению у их потомков и насколько существенно это может «затушевать» эффект радиации, были сформированы четыре группы животных. Две группы состояли из необлученных животных: быстро и прочно обучившихся условному рефлексу активно-

го избегания («умные») и животных, с трудом обучавшихся («глупые»). Полученное от них потомство, в свою очередь, было протестировано на способность к обучению. Было получено статистически значимое различие между этими двумя группами крыс, как по интегральным, так и по динамическим критериям обучения (табл. 2). В объединенном виде по

Таблица 2  
Влияние облучения сперматид родителей-крыс в дозе 0,5 Гр на условно-рефлекторную деятельность потомства  
[Table 2  
The effect of irradiation of spermatids of parent rats at a dose of 0.5 Gy on conditioned reflex activity of offspring]

Группа (количество животных) [Group (number of animals)]	Лag-фаза [Lag phase]	Общее количество УРИ [General the number of URI ]	Количество отказов [The number of failures]	ОБ-50 [ОВ-50]	Число крыс с сериями УРИ [The number of rats with a series of URI]
Интakтные животные от «умных» родителей (n=27) [Intact animals from smart parents (n = 27)]	2,9± 0,7	34,4± 2,3	1,3± 0,4	20,8 ± 1,4	24/127 (89%)
Интakтные животные от «глупых» родителей (n=27) [Intact animals from stupid parents (n = 27)]	11,7*± 2,6	21,1*± 2,9	2,1± 0,6	60,7*± 5,5	16/27* (59%)
«Сперматиды» 0,5 Гр от «умных» родителей (n=12) [“Spermatids” 0.5 Gy from “smart” parents (n = 12)]	1,9± 0,7	35,4± 2,3	2,3± 1,8	17,1± 1,9	12/12 (100%)
«Сперматиды» 0,5 Гр от «глупых» родителей (n=15) [«Spermatids» 0.5 Gy from «stupid» parents (n = 15)]	7,1*± 1,8	21,7± 2,9	5,9*± 2,0	57*/**± 4,8	8/15*/**(53%)

\* – статистически значимое различие с контролем от «умных» родителей при p<0,05;

\*\* – статистически значимое различие с группой «сперматиды» от «умных» родителей при p<0,05.

[\* – statistically significant difference with control from “smart” parents at p <0.05,

\*\* – statistically significant difference with the group of “spermatids” from “smart” parents at p <0.05]

показателям обучаемости эти животные послужили контролем для подопытных крыс. Ещё две группы составили такие же «умные» и «глупые» родители, но крысы-самцы из этих групп были подвергнуты острому облучению в дозе 0,5 Гр.

Потомков первого поколения, родившихся из яйцеклеток, оплодотворенных мужскими гаметами, облученными на стадии сперматид, протестировали и получили статистически значимые различия по интегративным показателям способности к обучению между животными, родившимися от «умных» и «глупых» родителей (см. табл. 2) и по динамике обучения. Суммарно эти животные составили подопытную группу для оценки влияния ионизирующего излучения.

Ниже приведены уравнения линейной регрессии вида  $y = B + A \cdot x$ , отражающие различия между уже объединенным контролем и объединенной группой потомков облученных родителей в уровне обученности и скорости обучения.

Контроль:  $y = 34,4 \pm 2,4 + (2,1 \pm 0,2) \cdot x$

«Сперматиды»:  $y = 29,4 \pm 3,0 + (2,4 \pm 0,2) \cdot x$

Сравнение по свободному члену уравнения:  $T(A) = 1,27$  (коэффициент Стьюдента при сравнении коэффициентов уравнения А уравнений регрессии контрольной и опытной групп).

Сравнение по наклону (по коэффициенту регрессии):  $T(B) = 1,29$  (коэффициент Стьюдента при сравнении коэффициентов уравнения В уравнений регрессии контрольной и опытной групп).

Различий между опытной и контрольной группами выявить не удалось. Полученные данные позволяют сделать вывод, что исходное состояние когнитивных функций мозга родителей влияет на развитие этих функций у потомства. Учет данного фактора позволит избежать методических ошибок, заключающихся в случайном формировании групп, неравноценных по исходным психофизиологическим параметрам. Установлено, что выраженность радиационного эффекта по данному критерию может существенно изменяться при разных подходах к формированию групп родителей.

### Заключение

В результате выполненного эксперимента были получены данные о том, что облучение самцов-родителей в дозе 0,5 Гр практически не отражается на когнитивных функциях их потомства первого поколения.

Проведенная нами экспериментальная работа показывает, что при оценке радиационного эффекта на когнитивные функции мозга отсутствие изначально сформированных равноценных родительских групп животных (подопытной и контрольной) может привести к получению необоснованных результатов. Предложенный нами подход к формированию родительских групп вполне подойдет и для выявления влияния на когнитивные функции

мозга потомства любых других слабых воздействующих факторов.

### Литература

1. Ильин Л.А., Коренков И.П., Наркевич Б.Я. Радиационная гигиена: учебник. 5-е издание. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. 416 с.
2. Ермалицкий А.П., Лягинская А.М. Развитие современной системы защиты гонад и плода в международных рекомендациях (МКРЗ) и отечественных нормах радиационной безопасности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2012. Т. 57, № 4. С. 5-12.
3. Соснина С.Ф., Сокольников М.Э. Наследуемые эффекты у потомков, связанные с вредным воздействием на родителей (Обзор литературы) // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 84-95.
4. Лягинская А.М., Туков А.Р., Осипов В.А. Врожденные пороки развития у потомства ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49, № 6. С. 694-702.
5. Mintz M., Gigi A., Shohami D., Myslobodsky M.S. Effect of prenatal exposure to gamma-rays on circling and activity behavior in prepubertal and postpubertal rats // Behavioural Brain Research. 1999. Vol. 98, No 1. P. 45-51.
6. Нефедов И.Ю., Палыга Г.Ф., Нефедова И.Ю. Особенности онтогенеза потомства обоих облученных родителей // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, № 3. С. 370-374.
7. Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П., Палыга Г.Ф., и др. Психофизиологическое развитие двух поколений потомства самок крыс, хронически облученных в дозе 1 Гр во время беременности, и возможность его модификации с помощью меланина // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47, № 2. С. 171-180.
8. Штемберг А.С., Кохан В.С., Кудрин В.С., и др. Воздействие высокоэнергетических протонов в пике Брэгга на поведение крыс и обмен моноаминов в некоторых структурах мозга // Нейрохимия. 2015. Т. 32, №1. С. 78-85.
9. Патрушева Н.В., Петрушкина Н.П., Ерохин Р.А., и др. Физическое развитие внуков лиц, подвергавшихся профессиональному, хроническому, сочетанному радиационному воздействию // Радиация и риск. 2002. Вып.13. С. 32-34.
10. Назарова Ю.В. Передаются ли умственные способности генетически? Сборник статей по результатам XI международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике». 2018. С. 165-168.
11. Навакатикян М.А. Методика изучения оборонительных условных рефлексов активного избегания // Журнал высшей нервной деятельности. 1992. Т. 42, № 4. С. 12-18.
12. Панфилова В.В., Колганова О.И., Жаворонков Л.П., и др. Условно-рефлекторная деятельность потомства первого поколения от самцов крыс, подвергшихся острому воздействию G-излучения в дозе 1 Гр (Сообщение 1) // Радиация и риск. 2014. Т. 23, № 3. С. 70-79.
13. Видничук С.С. К вопросу о роли наследственности и среды в развитии интеллекта // Актуальные проблемы психологического знания. 2018. № 4 (49). С. 19-43.

Поступила: 06.06.2020 г.

**Панфилова Виктория Викторовна** – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории исследования комбинированных воздействий, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал «Национального медицинского исследовательского центра радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации.  
**Адрес для переписки:** 249036, Калужская область, Обнинск, ул. Королёва, д. 4; E-mail: whiskas04@yandex.ru

**Колганова Ольга Ивановна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории исследования комбинированных воздействий, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал

«Национального медицинского исследовательского центра радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

**Чибисова Ольга Федоровна** – научный сотрудник лаборатории исследования комбинированных воздействий, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал «Национального медицинского исследовательского центра радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

**Жаворонков Леонид Петрович** – доктор медицинских наук, профессор научно-организационного отдела, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал «Национального медицинского исследовательского центра радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

**Для цитирования: Панфилова В.В., Колганова О.И., Чибисова О.Ф., Жаворонков Л.П. Специфика формирования родительских групп животных при определении влияния малых доз радиации на когнитивные функции потомства // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 34-39. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-34-39**

## The influence of learning ability of irradiated and intact rats-parents on higher brain function of their offspring

Viktoriya V. Panfilova, Olga I. Kolganova, Olga F. Chibisova, Leonid P. Zhavoronkov

A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

*The ability to train the offspring of male rats irradiated at a dose of 0.5 Gy was studied. Cognitive (memorable) brain functions were evaluated by their ability to develop and reproduce a conditioned reflex of active avoidance. It is established that the initial state of cognitive functions of the brain of parents affects the development of these functions in the offspring. Taking into account this factor will allow to avoid methodological errors, consisting in the random formation of groups, unequal in the initial psychophysiological parameters. The expediency of such a previously not used approach is demonstrated on the model of irradiation in a small dose (0.5 Gy) of male germ cells. It is established that the intensity of the radiation effect on this criterion can vary significantly with different approaches to the formation of groups of parents.*

**Key words:** rats, cognitive functions of the brain, learning ability, ionizing radiation, shuttle chamber.

### References

- Ilyin LA, Korenkov IP, Narkevich BYa. Radiation hygiene: a textbook. 5th edition. Moscow: GEOTAR-Media; 2017. 416 p. (In Russian)
- Ermalitsky AP, Lyaginskaya AM. Development of a modern gonad and fetus protection system in international recommendations (ICRP) and domestic radiation safety standards. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2012;57(4): 5-12. (In Russian)
- Sosnina SF, Sokolnikov ME. Inherited effects in offspring associated with harmful effects on parents (literature review). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 84-95. (In Russian)
- Lyaginskaya AM, Tukov AR, Osipov VA. Congenital malformations in the offspring of the liquidators of the consequences of the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2009;49(6): 694-702. (In Russian)
- Mintz M, Gigi A, Shohami D, Myslobodsky MS. Effect of prenatal exposure to gamma-rays on circling and activity behavior in prepubertal and postpubertal rats. *Behavioural Brain Research*. 1999;98(1): 45-51.
- Nefedov IYu, Palyga GF, Nefedova Yu. Features of ontogenesis of the offspring of both irradiated parents. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 1995;35(3): 370-374. (In Russian)
- Pavlova LN, Zhavoronkov LP, Palyga GF, Kolganova OI, Glushakova VS, Chibisova OF, et al. Psychophysiological development of two generations of offspring of female rats chronically irradiated at a dose of 1 Gy during pregnancy, and the possibility of its modification using melanin. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2007;47(2): 171-180. (In Russian)
- Shtemberg AS, Kokhan VS, Kudrin VS, Matveeva MI, Lebedeva-Georgievskaya KB, Timoshenko GN, et al. The effect of high-energy protons at the Bragg peak on the behavior of rats and the exchange of monoamines in some brain structures. *Neyrokhimiya = Neurochemistry*. 2015;32(1): 78-85. (In Russian)
- Patrusheva NV, Petrushkina NP, Erokhin RA, Fedorenko EP, Chemarina DV, Serebrennikova TG. Physical development of the grandchildren of persons exposed to professional,

**Viktoriya V. Panfilova**

A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation

**Address for correspondence:** Koroleva str., 4, Obninsk, 249036, Kaluga region, Russia; E-mail: whiskas04@yandex.ru

- chronic, combined radiation exposure. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2002;13: 32-34. (In Russian)
10. Nazarova YuV. Are mental abilities genetically transmitted? Collection of articles on the results of the XI international scientific-practical conference "Innovations in science and practice." 2018: 165-168. (In Russian)
11. Navakatikyan M.A. Methodology for the study of defensive conditioned reflexes of active avoidance. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti = Journal of Higher Nervous Activity*. 1992;42(4): 12-18. (In Russian)
12. Panfilova VV, Kolganova OI, Zhavoronkov LP, Pavlova LN, Ivanov VL, Palyga GF. The conditioned-reflex activity of first-generation offspring from male rats exposed to acute G-radiation at a dose of 1 Gy (Message 1). *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2014;23(3): 70-79. (In Russian)
13. Vidnichuk SS. To the question of the role of heredity and environment in the development of intelligence. *Aktualnye problemy psikhologicheskogo znaniya = Actual problems of psychological knowledge*. 2018;4(49): 19-43. (In Russian)

Received: June 06, 2020

**For correspondence: Viktoriya V. Panfilova** – Researcher of the laboratory study of the combined effects of A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation (Koroleva str., 4, Obninsk, 249036, Kaluga region, Russia; E-mail: whiskas04@yandex.ru)

**Olga I. Kolganova** – Senior researcher of the laboratory study of the combined effects of A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

**Olga F. Chibisova** – Researcher of the laboratory study of the combined effects of A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

**Leonid P. Zhavoronkov** – Professor of science education Department of A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

**For citation: Panfilova V.V., Kolganova O.I., Chibisova O.F., Zhavoronkov L.P. The influence of learning ability of irradiated and intact rats-parents on higher brain function of their offspring. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 34-39. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-34-39**

## Технологический процесс радиационной обработки пищевой продукции и дозиметрическое обеспечение

А.Н. Павлов<sup>1</sup>, Т.В. Чиж<sup>1</sup>, А.С. Снегирев<sup>1</sup>, Н.И. Санжарова<sup>1</sup>, А.П. Черняев<sup>2,3</sup>, П.Ю. Борщеговская<sup>2</sup>, В.С. Ипатова<sup>2</sup>, Ю.А. Дорн<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*В настоящем обзоре приведены основные виды и технические характеристики источников ионизирующего излучения, применяемых в настоящее время для радиационной обработки пищевых продуктов. Рассматривается понятие поглощенной дозы ионизирующего излучения в контексте технологических целей такой обработки. Представлены сведения об основных дозиметрических системах, используемых в современной практике дозиметрического контроля, а также критерии их калибровки, обсуждается построение распределения поглощенной дозы по продукту при проведении его радиационной обработки. Перечислены международные нормативные документы по использованию дозиметрических систем, а также приводится информация о современном состоянии отечественной нормативно-правовой базы в области дозиметрии обработки продуктов ионизирующим излучением.*

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, поглощенная доза, распределение дозы, дозиметрические системы, радиационная обработка, нормативные документы.

### Введение

В настоящее время одной из ключевых проблем продовольственной безопасности является разработка эффективных технологий обработки пищевой продукции, обеспечивающих, с одной стороны, улучшение и сохранение качества, а с другой – продление сроков хранения и реализации. Существующие технологии обработки основаны на использовании химических веществ, потенциально опасных для здоровья человека и окружающей среды. Одним из перспективных направлений является применение физических факторов, в частности, ионизирующего излучения, в технологиях производства, переработки и хранения пищевой продукции [1–4]. В различных странах функционирует более 500 специализированных центров по радиационной обработке различных видов пищевой продукции. Данная технология имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами [5, 6]. Основными направлениями применения технологий являются: обеспечение микробиологической безопасности пищевых продуктов и снижения потерь при хранении в результате подавления микроорганизмов порчи; увеличение сроков хранения (реализации) продукции при задержке

прорастания клубне- и корнеплодов и ингибировании созревания свежих фруктов и овощей; фитосанитарная обработка специй, пряностей, сухофруктов и др.; радиационная дезинсекция зерновых культур, круп, бобовых для уничтожения паразитов, насекомых-вредителей и их личинок.

Нормативная база по облучению пищевой продукции создавалась основными международными организациями под эгидой Международной продовольственной организации ООН (ФАО), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [7]. В 1983 г. был принят основополагающий нормативный документ CODEX STAN 106-1983<sup>1</sup> «Общий стандарт на пищевые продукты, обработанные проникающим излучением», который регламентирует допустимые к использованию источники ионизирующего излучения, правила гигиены, управление процессом и технологические требования, а также определяет порядок действий при проверке продукции после облучения. Международной консультативной группой по облучению продуктов питания (ICGFI) был разработан ряд документов по радиационной обработке конкретных ви-

<sup>1</sup> CAC (Codex Alimentarius Commission). Codex General Standard for Irradiated Foods. CODEX STAN 106-1983. 2003. Rev. 1.

**Чиж Тарас Васильевич**

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

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

дов пищевых продуктов с рекомендациями о верхнем пороге применяемой дозы облучения с учетом достижения необходимой технологической цели; требований к видам установок и дозиметрии процесса облучения [8].

На территории Российской Федерации и стран-членов Евразийского экономического союза базовым нормативным документом, учитывающим международные требования, является ГОСТ ISO 14470-2014 «Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением»<sup>2</sup>.

В CODEX STAN 106-1983 определено, что при облучении любого продукта максимальная «общая средняя доза» должна составлять не более 10 кГр. Максимально допустимое значение поглощенной дозы в пищевой продукции основано на токсикологических данных. Для ряда категорий продуктов определены диапазоны доз ионизирующего излучения, которые обеспечивают достижение необходимых параметров целей обработки, в частности, микробиологической или фитосанитарной безопасности, и не приводят к изменению физико-химических и органолептических свойств обрабатываемой продукции. Необходимое значение поглощенной дозы в облучаемой продукции варьирует в зависимости от целей обработки и условий ее проведения [8]. В связи с этим большое значение имеет вопрос использования различных дозиметрических систем для контроля процесса радиационной обработки. На сегодняшний день разработан и регламентирован международными и национальными стандартами ряд методов дозиметрии, базирующихся на различных физико-химических принципах.

В настоящем обзоре представлены: виды и технические характеристики источников ионизирующего излучения, применяемых для радиационной обработки пищевых продуктов; основные дозиметрические системы, используемые в современной практике дозиметрического контроля; нормативные документы по использованию дозиметрических систем и современное состояние отечественной нормативно-правовой базы.

### 1. Характеристика источников излучения

Для радиационной обработки пищевых продуктов разрешено применять установки со следующими видами ионизирующего излучения:

- электронное излучение с энергией не более 10 МэВ;
- $\gamma$ -излучение радиоизотопа  $^{60}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 5,27$  года,  $E = 1,25$  МэВ);

–  $\gamma$ -излучение радиоизотопа  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30,17$  года,  $E = 0,66$  МэВ);

– рентгеновское (тормозное) излучение, генерируемое ускорителями электронов с энергией не более 5 МэВ.

Ограничение верхнего энергетического предела для электронного и тормозного излучений связано с тем, что при указанных энергиях не происходят процессы образования радиоактивных изотопов в продукте [9].

Каждый вид излучателя, генерирующий перечисленные типы излучений, имеет собственные характеристики. Для ускорителей электронов основными характеристиками являются энергетический спектр электронов, ток пучка и, в зависимости от конструкции, мгновенный (импульсный) ток с указанием длительности импульса и частоты следования<sup>3,4</sup>, для рентгеновской установки – напряжение между электродами, ток трубки, материал анода, его толщина; спектр рентгеновского излучения<sup>5</sup>.

Для установок с гамма-источниками, состоящих из герметизированных элементов и представляющих собой, как правило, набор стержней и образующих плоскую или цилиндрическую решетку или несколько таких решеток, содержащих внутри изотопы  $^{60}\text{Co}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ), основными характеристиками являются тип облучателя, активность источника и геометрия гамма-излучателя, а также спектр излучения<sup>6</sup>.

Выбор типа излучения и его источника при проведении радиационной обработки зависит от вида продукции, а также от целей обработки. При использовании гамма-установок облучения продукции происходит в промышленных упаковках, обеспечивается облучение больших объемов продукции с соблюдением технологически рекомендуемого верхнего предела значений поглощенной дозы. Основной проблемой использования установок с радиоактивными источниками является потребность в корректировке технологического процесса облучения в зависимости от распада радионуклидов и периодическая замена источников излучения  $^{60}\text{Co}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ).

Основное преимущество ускорителей с электронным и рентгеновским (тормозным) излучением – они генерируют ионизирующее излучение только во включенном состоянии.

Мощность пучка электронов плавно регулируется от 0 до максимальной, у них нет спада активности излучения вследствие идущего процесса распада, они не требуют, в отличие от гамма-установок, регулярной дозагрузки новыми источниками ионизирующего излучения. Основной проблемой ускорителей электронов является относи-

<sup>2</sup> ГОСТ ISO 14470-2014. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением. Введ. 2016-01-01 [GOST ISO 14470-2014. Food irradiation. Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food. Introduced on 2016-01-01. (In Russ.)]

<sup>3</sup> ISO/ASTM 51818:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 80 and 300 keV.

<sup>4</sup> ISO/ASTM 51649:2015. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV.

<sup>5</sup> ISO/ASTM 51608:2015. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an X-ray (bremsstrahlung) facility for radiation processing at energies between 50 keV and 7.5 MeV.

<sup>6</sup> ISO/ASTM 51702:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for dosimetry in gamma irradiation facilities for food processing.

тельно небольшая проникающая способность электронного пучка. Проникающая способность зависит от энергии электронов и плотности облучаемого продукта (чем выше плотность вещества, тем меньше глубина проникновения). Для обработки продуктов питания с высокой плотностью энергии электронов 5 или даже 10 МэВ может быть недостаточно. В таком случае можно применять обработку тормозным излучением, но при этом энергия электронов ограничивается 5 МэВ, и значительно возрастает, по сравнению с гамма-установками, себестоимость облучения [10].

## 2. Физические характеристики радиационной обработки

### Поглощенная доза

Метод базируется на ионизации и возбуждении атомов вещества вследствие передачи ему энергии излучения. Интенсивность физико-химических процессов, запускаемых излучением, зависит от его физических характеристик, таких как тип и энергия воздействующих частиц, переданная объему продукта энергия, интенсивность излучения, линейная передача энергии излучения, линейная плотность ионизации и др. [11]. Не вся переданная энергия расходуется в пределах данного объема. Та часть энергии, которая остается в рассматриваемом объеме, составляет поглощенную энергию. Средняя поглощенная энергия рассматривается как детерминированная величина, а ее величина рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta E = \sum \varepsilon_{in} - \sum \varepsilon_{out} + \sum Q_1 - \sum Q_2, \quad (1)$$

где  $\sum \varepsilon_{in}$  – сумма кинетических энергий всех частиц, как непосредственно, так и косвенно ионизирующих, входящих в рассматриваемый объем;  $\sum \varepsilon_{out}$  – суммарная кинетическая энергия всех частиц, покинувших данный объем;  $\sum Q_1$  – суммарная выделившаяся в результате

ядерных превращений энергия;  $\sum Q_2$  – суммарная затраченная на ядерные превращения энергия.

Для обработанных ионизирующим излучением продуктов питания формула (1) принимает вид (2), т.к. используемые в радиационном методе энергии не инициируют ядерные превращения:

$$\Delta E = \sum \varepsilon_{in} - \sum \varepsilon_{out}, \quad (2)$$

Важнейшей характеристикой радиационного метода является доза  $D$ , поглощенная объектом обработки. Она равна отношению средней энергии  $dE$ , поглощенной элементарным объемом  $dV$ , к массе  $dm$  вещества в этом объеме [11]:

$$D = \frac{dE}{dm} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}, \quad (3)$$

Точное измерение дозы, поглощенной продуктом, необходимо для определения и контроля оптимальных параметров радиационной обработки. В таблице 1 приведены классы различных пищевых продуктов с указаниями максимально применяемых значений доз для достижения конкретных целей облучения [12].

### Распределение поглощенной дозы по объему продукта

При проведении радиационной обработки важно контролировать не только интегральную дозу, но и ее распределение по объему продукта. Различные режимы обработки предполагают отличные друг от друга дозовые распределения по глубине обрабатываемого объекта. Также необходимо учитывать такие параметры, как движение конвейера во время облучения, энергию излучения, схему, геометрию образцов, их плотность и т.п.

Схема облучения продукции на электронном ускорителе включает: расположение объекта в форме параллелепипеда; конвейерную ленту, движущуюся со скоростью  $V_{конв}$ ; два источника электронного излучения от ускорителей электронов с энергией 10 МэВ (рис. 1) [8].

Таблица 1

### Технологически рекомендуемые пределы поглощенных доз

[Table 1]

#### Authorization of irradiation by classes of food and advisory technological dose limits]

Классы пищевых продуктов [Classes of food]	Цель облучения [Main purposes of food irradiation]	Максимальная доза, кГр [Maximum dose, kGy]
Класс 1: Луковицы, корнеплоды, клубни [Class 1: Bulbs, roots, tubers]	Замедление прорастания в процессе хранения [Sprout inhibition in storage]	0,2
Класс 2: Свежие фрукты и овощи, не включенные в 1 класс [Class 2: Fresh fruits and vegetables, not included in class 1]	Замедление созревания	1,0
	Уничтожение насекомых	1,0
	Увеличение срока хранения	2,5
	Карантинный контроль импортируемой и экспортируемой сельскохозяйственной продукции [Inhibition of ripening Insect disinfection Shelf-life extension Quarantine treatment for import and export trade]	1,0
Класс 3: Зерно злаковых и мука, орехи, семена масличных культур, бобовые, сушеные фрукты [Class 3: Cereals and flours, nuts, oilseeds, legumes, dried fruits]	Уничтожение насекомых Снижение количества микроорганизмов [Insect disinfection Microbial decontamination]	1,0 5,0

Классы пищевых продуктов [Classes of food]	Цель облучения [Main purposes of food irradiation]	Максимальная доза, кГр [Maximum dose, kGy]
	Снижение количества определенных патогенных микроорганизмов	5,0
Класс 4: Рыба, морепродукты (свежие или замороженные) и продукты их переработки [Class 4: Fish, seafood (fresh or frozen), and processed foods]	Увеличение срока хранения	3,0
	Контроль заражения паразитами в продукции, поставляемой на внутренний рынок	2,0
	[Microbial pathogen decontamination Shelf-life extension Microbial pathogen control in products sold on the domestic market]	
Класс 5: Сырое мясо птицы, говядина, свинина (свежее или замороженное) и продукты их переработки [Class 5: Raw poultry, beef, pork (fresh or frozen), and processed foods]	Сокращение количества патогенных микроорганизмов	7,0
	Увеличение срока хранения	3,0
	Контроль заражения паразитами в продукции, поставляемой на внутренний рынок	2,0
Класс 6: Сухие овощи, специи, приправы, корма для животных, сухие травы и травяные чаи [Class 6: Dry vegetables, spices, condiments, animal feeds, dry herbs, and herbal teas]	[Microbial pathogen decontamination Insect disinfection]	10,0 1,0
	Дезинфекция	1,0
Класс 7: Сухие продукты животного происхождения [Class 7: Dry products of animal origin]	Сдерживание роста плесеней	3,0
	[Disinfection Mold growth control]	
Класс 8: Смешанная пища (космическая и больничная еда, армейские рационы, специи и др.) [Class 8: Mixed food (space and hospital food, army rations, spices, etc.)]	Снижение количества микроорганизмов	>10
	Стерилизация	>10
	Карантинный контроль импортируемой и экспортируемой сельскохозяйственной продукции	>10
	[Microbial decontamination Sterilization Quarantine treatment for import and export trade]	

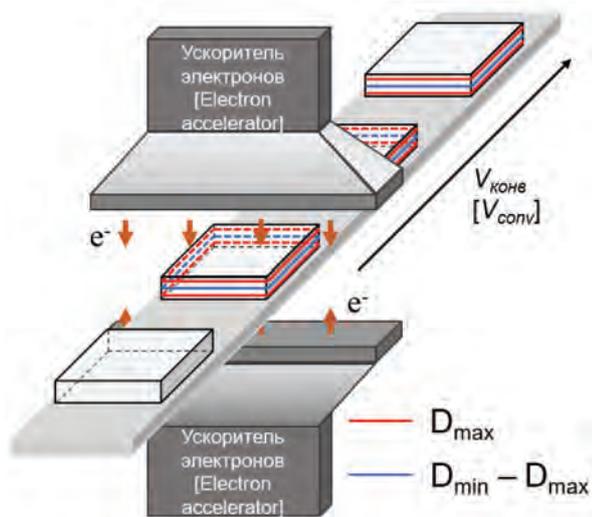


Рис. 1. Технология обработки электронным излучением  
[Fig. 1. The technology for electron irradiation processing]

Варьируя скорость конвейера  $V_{конв}$  и ток пучка электронов, можно контролировать интегральную дозу, поглощенную продуктом.

Схема облучения продукции на гамма-установке включает: расположение объекта в форме куба, движущегося вместе с конвейерной лентой со скоростью  $V_{конв}$  и облучаемого с двух противоположных сторон источником гамма-излучения, содержащим несколько источников  $^{60}\text{Co}$  или  $^{137}\text{Cs}$  (рис. 2).

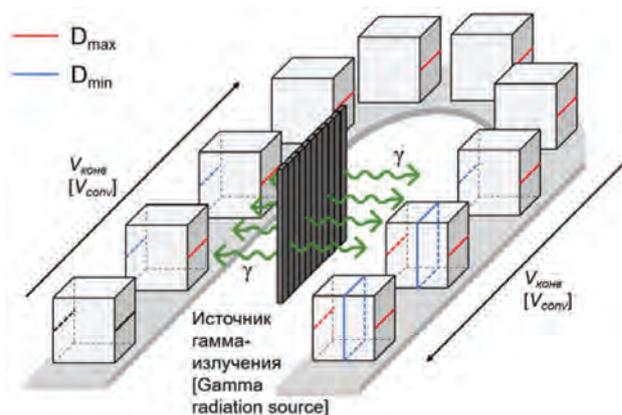


Рис. 2. Технология обработки гамма-излучением  
[Fig. 2. The technology for gamma radiation processing]

На распределение дозы по объему продукта влияют не только характеристики установки, плотность продукта, но также размеры и геометрия упаковки.

Таким образом, интегральная доза, поглощенная продуктом, ее распределение по объему зависят от физических параметров радиационной обработки (энергия источника излучения; тип источника и его геометрия; технология облучения; плотность, размеры и геометрия упаковки). Указанные параметры являются основными составляющими эффективности процесса облучения [13–16].

### 3. Дозиметрические системы, применяемые при радиационной обработке

Целью дозиметрии при разработке регламента радиационной обработки является установление оптимальной геометрии облучения продуктов, включая выбор всех ключевых параметров процесса и предоставление доказательств воспроизводимости дозы и ее распределения. Выбор и использование конкретных измерительных систем дозиметрии должны обосновываться с учетом диапазона доз, типа излучения, максимально возможной эффективности облучения для достижения заданной технологической задачи.

#### Классификация дозиметрических систем

Для каждого метода дозиметрии существует свой рабочий диапазон доз и метод анализа, дающий достоверный и точный, в пределах погрешности, результат дозиметрических исследований.

В таблице 2 приведены используемые в современной практике дозиметрические системы, методы анализа полученных системой данных, рекомендуемые к применению рабочие диапазоны доз, а также погрешности дозиметрических приборов<sup>7</sup>.

#### Калибровка систем дозиметрии

Выбор и использование дозиметрических систем осуществляются с учетом диапазона доз, типа излучения, а также влияния таких факторов, как мощность дозы, требуемый уровень погрешности измерений и пространственное разрешение. Дозиметры, применяемые в ходе радиационной обработки, должны быть откалиброваны в соответствии национальными стандартами ISO/ASTM 51261:2013, с использованием специальной калибровочной функции с поглощенной дозой в качестве аргумента.

Процедура калибровки заключается в облучении дозиметров в определенном диапазоне доз, считывании показаний с помощью калиброванного измерительного прибора и построении функции отклика (калибровочной функции). Существует несколько основных методов калибровки дозиметров [8].

#### Картирование поглощенной дозы при радиационной обработке

Целью картирования является определение областей продукта, где достигаются максимальные и минимальные значения поглощенной дозы и их связи со значениями поглощенной дозы в тех точках, которые используются для мониторинга значений дозы в процессах обработки продукта.

При картировании дозиметры следует размещать по всему образцу, как на поверхности, так и внутри образца, если это возможно. Для построения качественной карты дозы в объеме продукта необходимо выбирать схемы размещения дозиметров так, чтобы можно было максимально точно обнаружить положения минимальных и максимальных значений доз [8]. При картировании учитываются: характеристики объекта облучения; схемы перемещения и конфигурация контейнера; физико-технические характеристики облучателя; анализ результатов измерений дозы и

Дозиметрические системы, методы их анализа и рекомендуемые дозы

Таблица 2

[Table 2

Dosimetry Systems and Their Limits of Applicability]

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Метод анализа [Method of analysis]	Рабочий диапазон, Гр [Radiation dose range, Gy]	Погрешность [Uncertainty]	Название стандарта [Standards products]
Дозиметр Фрике [Fricke dosimeter]	УФ-спектрофотометрия [UV/VIS Spectrophotometry]	2·10 <sup>-1</sup> – 4·10 <sup>2</sup>	1%	ASTM E 1026 <sup>8</sup>
Цериевый дозиметр [Cerierous sulfate dosimeter]	УФ-спектрофотометрия [UV/VIS Spectrophotometry]	5·10 <sup>2</sup> – 5·10 <sup>4</sup>	3%	ISO/ASTM 51205 <sup>9</sup>
Дихромат серебра [Dichromate dosimeter]	УФ- или оптическая спектрофотометрия [UV/VIS or optical Spectrophotometry]	2·10 <sup>3</sup> – 4·10 <sup>4</sup>	1%	ISO/ASTM 51401 <sup>10</sup>

<sup>7</sup> ISO/ASTM 51261:2013. Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing.

<sup>8</sup> ASTM E1026-13. American society for testing and materials, Standard practice for using the Fricke reference standard dosimetry system.

<sup>9</sup> ISO/ASTM 51205:2017. International organization for standardization, American society for testing and materials, Standard practice for use of the ceric-cerous sulphate dosimetry system.

<sup>10</sup> ISO/ASTM 51401:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of a dichromate dosimetry system.

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Метод анализа [Method of analysis]	Рабочий диапазон, Гр [Radiation dose range, Gy]	Погрешность [Uncertainty]	Название стандарта [Standards products]
Этанол-хлорбензол (ЕСВ-дозиметр) [Ethanol-Chlorobenzene (ECB) dosimeter]	Цветовое титрование, ВЧ-осциллометрия [Color titration, High-frequency titration]	10 – 2·10 <sup>6</sup>	3%	ISO/ASTM 51538 <sup>11</sup>
L-аланин [Alanine-EPR dosimeter]	ЭПР-спектрометрия [EPR spectrometry]	1 – 1,5·10 <sup>5</sup>	0,5%	ISO/ASTM 51607 <sup>12</sup>
Полиметилметакрилат (PMMA) [Polymethyl methacrylate (PMMA) dosimeter]	УФ- или оптическая спектрофотометрия [UV/VIS or optical Spectrophotometry]	10 <sup>3</sup> – 5·10 <sup>4</sup>	4%	ISO/ASTM 51276 <sup>13</sup>
Радиоохромная пленка FWT-60 [Radiochromic film FWT-60]	Оптическая спектрофотометрия [Optical spectrophotometry]	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>5</sup>	3%	ISO/ASTM 51275 <sup>14</sup>
Радиоохромная пленка В3 [Radiochromic film В3]	Оптическая спектрофотометрия [Optical spectrophotometry]	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>5</sup>	3%	ISO/ASTM 51275
Калориметрия [Calorimetry]	Измерение сопротивления/ температуры [Resistance / temperature measurement]	10 <sup>2</sup> – 5·10 <sup>4</sup>	2%	ISO/ASTM 51631 <sup>15</sup>
Триацетат целлюлозы [Cellulose Triacetate (CTA) dosimeter]	УФ-спектрофотометрия [UV/VIS Spectrophotometry]	10 <sup>4</sup> – 3·10 <sup>5</sup>	3%	ISO/ASTM 51650 <sup>16</sup>
Термолюминесцентный дозиметр (TLD) [Thermoluminescence dosimeter (TLD)]	Термолюминесцентное датирование [Thermoluminescence dating]	1 – 10 <sup>4</sup>	2%	ISO/ASTM 51956 <sup>17</sup>
LiF (литий-фтор) пленочный дозиметр [LiF photo-fluorescent film dosimeter]	Оптически-стимулированная люминесценция [Optically stimulated luminescence]	50 – 3·10 <sup>5</sup>	3%	ASTM E 2304 <sup>18</sup>

оценка погрешности измерений; расположение областей в объекте облучения, где достигаются значения минимальной дозы и максимальной дозы; диапазон времени для целевых диапазонов доз; коэффициенты между значениями минимальной и максимальной дозы, измеренными эталонным и рабочим дозиметрами; пределы доз для эталонного и рабочего дозиметров; тип, расположение и частота

расположения дозиметров, которые используются в ходе обработки данного типа продукции<sup>19</sup>.

После составления карты доз устанавливается взаимосвязь между значениями измеряемых доз и физико-техническими характеристиками работы облучателя. Полученную карту дозовых полей используют во время эксплуатационной аттестации объекта обработки, когда

<sup>11</sup> ISO/ASTM 51538:2017. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of the ethanol-chlorobenzene dosimetry system.

<sup>12</sup> ISO/ASTM Standard 51607:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of the alanine-EPR dosimetry system.

<sup>13</sup> ISO/ASTM 51276:2012. International organization for standardization, American society for testing and materials, Standard practice for use of a polymethylmethacrylate dosimetry system.

<sup>14</sup> ISO/ASTM 51275:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of a radiochromic film dosimetry system.

<sup>15</sup> ISO/ASTM 51631:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of calorimetric dosimetry systems for electron beam dose measurements and dosimeter calibrations.

<sup>16</sup> ISO/ASTM 51650:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Standard practice for use of cellulose acetate dosimetry systems.

<sup>17</sup> ISO/ASTM 51956:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of a thermoluminescence – dosimetry system (TLD system) for radiation processing.

<sup>18</sup> ASTM E2304-03(2011). American society for testing and materials, Standard practice for use of a LiF photo-fluorescent film dosimetry system.

<sup>19</sup> ISO/ASTM 52303:2015. Guide for absorbed-dose mapping in radiation processing facilities.

облучение выполняется с однородным материалом, и во время аттестации производительности – когда облучение выполняется с неоднородным материалом (для реальных продуктов питания).

*Дозиметрические системы при радиационной обработке продуктов питания: Нормативная база Евразийского экономического союза (ЕАЭС)*

Основным стандартом по радиационной обработке продуктов питания ЕАЭС является ГОСТ ISO 14470-2014, включающий следующие основные положения:

- обеспечение требований к облучению пищевых продуктов в соответствии с действующими стандартами и практикой;
- выработка предписаний, способствующих достижению соглашения по техническим вопросам между заказчиком и оператором облучателя;
- разработка системы ведения документации с учетом управления процессом облучения продуктов.

В соответствии с требованиями ГОСТ ISO 14470-2014 дозиметрия должна осуществляться для получения гарантий того, что в каждом акте облучения пищевого продукта им была получена строго определенная поглощенная доза. Поглощенная доза должна измеряться с использованием дозиметрической системы, специально разработанной для этой цели. Необходимо также осуществлять контроль и документально регистрировать поглощенную дозу для проверки на соответствие техническим условиям обработки.

Межгосударственным советом ЕАЭС по стандартизации, метрологии и сертификации приняты следующие стандарты в области дозиметрии:

- ГОСТ 34157-2017. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением<sup>20</sup>;
- ГОСТ 34156-2017. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов гамма-излучением<sup>21</sup>;
- ГОСТ 34155-2017. Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты<sup>22</sup>.

Данные стандарты гармонизированы с международными документами и содержат описание дозиметрических

систем, необходимых для оценки операционного и технологического качества процессов повседневной обработки пищевых продуктов пучками высокоэнергетических электронов, рентгеновским (тормозным) излучением и гамма-излучением.

Рабочий диапазон доз, необходимый для достижения целей радиационной обработки, регламентируется государственными стандартами, при разработке которых учитывались результаты научных исследований по влиянию ионизирующего излучения на различные характеристики продуктов питания. На сегодняшний день продолжают исследования по поиску необходимых дозовых диапазонов для различных категорий продуктов. После проведения облучения продукт должен соответствовать общим стандартам качества, предъявляемым к данному виду продукции.

Применение дозиметрических систем регулируется специально разработанным ГОСТом для обеспечения единства измерений ГОСТ 8.070-2014<sup>23</sup>. Данный документ регламентирует схему измерений поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы, эквивалента дозы и мощности эквивалента дозы фотонного и электронного излучений в диапазоне энергий фотонного излучения от 0,015 до 50 МэВ и электронного излучения от 5 до 50 МэВ, полученных от государственных первичных эталонов поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы. В качестве первичного эталона утвержден Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий<sup>24</sup>. Максимальное значение мощности поглощенной дозы, воспроизводимое эталоном (по электронному излучению), составляет  $2 \cdot 10^5$  Гр/с [17]. В таблице 3 представлены основные характеристики эталона ГЭТ 209-2014 для фотонного, электронного и бета-излучений.

В 2016 г. был принят «План разработки межгосударственных нормативных документов об обеспечении единства измерений при радиационной обработке пищевых

<sup>20</sup> ГОСТ 34157-2017. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением. Введ. 2019-02-01 [GOST 34157-2017. Standard Practice for Dosimetry in Electron Beam and X-Ray (Bremsstrahlung) Irradiation Facilities for Food Processing. Introduced on 2019-02-01. (In Russ.)]

<sup>21</sup> ГОСТ 34156-2017. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов гамма-излучением. Введ. 2019-02-01 [GOST 34156-2017. Practice for dosimetry in gamma Irradiation facilities for food processing. Introduced on 2019-02-01. (In Russ.)]

<sup>22</sup> ГОСТ 34155-2017. Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты. Введ. 2019-02-01 [GOST 34155-2017. Guide for dosimetry in radiation research on food and agricultural products. – Introduced on 2019-02-01. (In Russ.)]

<sup>23</sup> ГОСТ 8.070-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы, эквивалента дозы и мощности эквивалента дозы фотонного и электронного излучений. Введ. 2015-07-01 [GOST 8.070-2014. State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification schedule for means measuring absorbed doses and rate of absorbed dose, dose equivalent and rate of equivalent doses of photon and electron radiation. Introduced on 2015-07-01. (In Russ.)]

<sup>24</sup> ГЭТ 209-2014. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий [GET 209-2014. The state primary special standard of the unit of absorbed dose rate of intense photon, electron and beta radiation for radiation technology. (In Russ.)]

## Основные характеристики эталона ГЭТ 209-2014

[Table 3]

## The Main Characteristics of The Standard GET 209-2014]

Диапазоны значений величин [Value ranges]	Фотонное излучение [Photon radiation]	Электронное излучение [Electron radiation]	Бета-излучение [Beta radiation]
Характеристики [Characteristics]			
Энергии излучения, МэВ [Radiation energy, MeV]	0,66 – <sup>137</sup> Cs 1,25 – <sup>60</sup> Co	От 3 до 10 [from 3 to 10]	До 2,3 (макс) <sup>90</sup> Y+ <sup>90</sup> Sr [up to 2,3 (max) <sup>90</sup> Y+ <sup>90</sup> Sr]
Мощности поглощенной дозы, Гр/с [Absorbed dose rate, Gy/s]	От 0,3 до 10 <sup>3</sup> [from 0,3 to 10 <sup>3</sup> ]	От 10 <sup>2</sup> до 2×10 <sup>5</sup> [from 10 <sup>2</sup> to 2×10 <sup>5</sup> ]	От 0,3 до 10 <sup>2</sup> [from 0,3 to 10 <sup>2</sup> ]
Среднее квадратическое отклонение [Standard deviation]	1,5×10 <sup>-3</sup>	5×10 <sup>-3</sup>	5×10 <sup>-3</sup>
Суммарная стандартная неопределенность [Total standard uncertainty]	6×10 <sup>-3</sup>	2,8×10 <sup>-2</sup>	1,4×10 <sup>-2</sup>
Суммарная расширенная неопределенность, K=2 [Total expanded uncertainty, K=2]	7×10 <sup>-3</sup>	2,4×10 <sup>-2</sup>	1,4×10 <sup>-2</sup>

продуктов. Государство разработчик – Россия». В результате реализации плана утвержден в качестве рабочего средства измерений межгосударственный стандартный образец поглощенной дозы на основе радиохромных пленок для фотонного и электронного излучений (сополимер с 4-диэтиламиноазобензоловым красителем) «СО ПД(Э) – 1/10» ГСО 8916-2007 [18], который разрешено использовать при работе на радиационных технических установках, использующих радионуклидные источники и ускорители электронов.

С 1 июля 2020 г. введен межгосударственный стандарт ГОСТ 8.664-2019<sup>25</sup>. Настоящий стандарт распространяется на пищевые продукты, обрабатываемые ионизирующим излучением, и устанавливает общие требования к дозиметрии на этапах подготовки и проведения процесса радиационной обработки на радиационно-технологических установках с ускорителями электронов (тормозное и электронное излучение) и с радионуклидными источниками ионизирующих излучений.

### Заключение

При сопоставлении международных и национальных систем нормативного регулирования радиационной обработки продуктов можно сделать вывод о том, что на данный момент в России достаточно информации, позволяющей конкретному производителю регламентировать процесс облучения пищевых продуктов.

При этом необходимо отметить, что одного официально утвержденного на территории ЕАЭС рабочего средства измерений «СО ПД(Э) – 1/10» недостаточно для осуществления надлежащего дозиметрического контроля процесса радиационной обработки продуктов питания. Необходимо разработать (на основе международных) и принять межгосударственные стандарты ЕАЭС, регламентирующие использование конкретных дозиметрических систем, необходимых для достижения заданной компетенции технологического процесса облучения.

Важно отметить, что Роспотребнадзором разработан и находится на стадии согласования проект Решения Совета Евразийской экономической комиссии «О внесении изменений в технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011)», в соответствии с которым вводится понятие «облучение (радиационная обработка) пищевой продукции», а также устанавливаются требования безопасности облученных пищевых продуктов. Отсутствие в ТР ТС 021/2011 данных поправок является сдерживающим фактором для более широкого использования радиационных технологий в различных отраслях агропромышленного комплекса.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-316-90012.*

<sup>25</sup> ГОСТ 8.664-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Пищевые продукты. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к дозиметрическому обеспечению. Введ. 2020-07-01 [GOST 8.664-2019. State system for ensuring the uniformity of measurements. Foodstuffs. Foodstuffs radiation processing. Requirements to dosimetry provision. Introduced on 2020-07-01. (In Russ.)]

## Литература

- Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. European Food Safety Authority // EFSA Journal. 2011. Vol. 9, No. 4. P. 2107.
- Козьмин Г.В., Кобялко В.О., Лыков И.Н., и др. Радиационные агробиотехнологии: исследования микробиологической безопасности и качества облучённой продукции // Сборник трудов регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований. Калуга, 01 января 2014 г. Калуга: КГИРО, 2015. С. 216-225.
- Козьмин Г.В., Кобялко В.О., Лыков И.Н., и др. Качество и безопасность многокомпонентных пищевых продуктов в зависимости от дозиметрических параметров облучения // Сборник трудов регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований Калуга, 01 января 2015 г. Калуга: КГИРО, 2016. С. 230-239.
- Исамов Н.Н., Санжарова Н.И., Кобялко В.О., и др. Применение радиационных технологий для обеспечения безопасности продуктов животного происхождения // Все о мясе. 2017. № 1. С. 11-15.
- Козьмин Г.В., Гераскин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.
- Черняев А.П., Варзарь С.М., Белоусов А.В., и др. Перспективы развития радиационных технологий в России // Ядерная физика. 2019. Т. 82, № 5. С. 425-439.
- Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech. Report Ser. 659. World Health Organization: Geneva. 1981.
- Manual of Good Practice in Food Irradiation. Sanitary, Phytosanitary and Other Applications. Technical Report Series No. 481. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2015. 85 P.
- Chernyaev A.P., Bliznyuk U.A., Borchegovskaya P.Yu., et al. Treatment of Refrigerated Trout with 1 MeV Electron Beam to Control Its Microbiological Parameters // J. Physics of Atomic Nuclei. 2018. Vol. 81, No. 11. P. 1656-1659.
- Барабанов В.В., Безуглов В.В., Брязгин А.А., и др. Мощные импульсные линейные ускорители электронов ИЛУ и их применение в пищевой промышленно-
- сти // Сборник докладов круглого стола в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, Москва, 21 сентября 2016 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. С. 48-55.
- Климанов В.А., Крамер-Агеев Е.А., Смирнов В.В. Дозиметрия ионизирующих излучений: учеб. пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 740 с.
- Guidelines for the Authorization of Food Irradiation Generally or by Classes of Food. ICGFI Document No. 15, Vienna, 1994.
- Пименов Е.П., Павлов А.Н., Козьмин Г.В., и др. Исследование эффективности радиационной стерилизации растительного сырья с использованием установок ГУР-120 // Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 4. С. 37-42.
- Bliznyuk U.A., Borchegovskaya P.Yu., Chernyaev A.P., et al. Computer simulation to determine food irradiation dose levels // J. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 365. P. 012002.
- Черняев А.П., Авдюхина В.М., Близняк У.А., и др. Исследование эффективности радиационной обработки форели электронным с рентгеновским излучением // Известия РАН, серия физическая. 2020. Т. 84, № 4. С. 501-507.
- Близняк У.А., Авдюхина В.М., Борщеговская П.Ю., и др. Инновационные подходы к развитию радиационных технологий обработки биообъектов // Известия РАН, серия физическая. 2018. Т. 82, № 6. С. 824-828.
- Генералова В.В., Гурский М.Н., Громов А.А., и др. Эталон единицы мощности поглощенной дозы для радиационных технологий // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Радиационные Технологии в Сельском Хозяйстве и Пищевой Промышленности: Состояние и Перспективы 2018», Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. С. 147-151.
- Громов А.А., Жанжора А.П., Коваленко О.И., Тенишев В.П. Обработка пищевых продуктов ионизирующим излучением в Российской Федерации // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Радиационные Технологии в Сельском Хозяйстве и Пищевой Промышленности: Состояние и Перспективы 2018», Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. С. 151-154.

Поступила: 03.07.2020 г.

**Павлов Александр Николаевич** – кандидат биологических наук, главный специалист Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

**Чиж Тарас Васильевич** – младший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии. **Адрес для переписки:** 249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; E-mail: taras.chizh@rambler.ru

**Снегирев Алексей Сергеевич** – младший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

**Санжарова Наталья Ивановна** – доктор биологических наук, профессор, директор Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

**Черняев Александр Петрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, заведующий лабораторией пучковых технологий и медицинской физики Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**Борщеговская Полина Юрьевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**Ипатова Виктория Сергеевна** – магистрант кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**Дорн Юлия Андреевна** – аспирант Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Для цитирования: Павлов А.Н., Чиж Т.В., Снегирев А.С., Санжарова Н.И., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю., Ипатова В.С., Дорн Ю.А. Технологический процесс радиационной обработки пищевой продукции и дозиметрическое обеспечение // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 40-50. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50

## Technological process of food irradiation and dosimetric support

Aleksandr N. Pavlov<sup>1</sup>, Taras V. Chizh<sup>1</sup>, Aleksey S. Snegirev<sup>1</sup>, Natalya I. Sanzharova<sup>1</sup>, Aleksandr P. Chernyaev<sup>2,3</sup>, Polina Yu. Borshegovskaya<sup>2</sup>, Viktoriya S. Ipatova<sup>2</sup>, Yuliya A. Dorn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

*The study represents the main types and technical characteristics of irradiation sources currently used for processing of foodstuffs. An absorbed irradiation dose is considered in the context of the technological goals of such treatment. The article discusses the standard dosimetry systems for irradiation treatment of foods, as well as the criteria for calibration and mapping of doses absorbed by a product. The article includes several references to international and Russian regulatory documents on dosimetry systems for food irradiation.*

**Key words:** ionizing radiation, absorbed dose, dose distribution, dosimetry systems, irradiation processing, regulatory documents.

### References

- Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. European Food Safety Authority. *EFSA Journal*. 2011;9(4): 2107.
- Kozmin GV, Kobyal'ko VO, Lykov IN, Sarukhanov VYa, Zyakun AM, Pavlov AN, et al. Radiation agrobiotechnologies: studies of microbiological safety and quality of irradiated products. In: Proceedings of the Regional Competition of Fundamental Research Projects, Kaluga: KGIRO; 2015. P. 216-225 (In Russian)
- Kozmin GV, Kobyal'ko VO, Lykov IN, Sarukhanov VYa, Zyakun AM, Pavlov AN, et al. Quality and safety of multicomponent food products depending on dosimetric parameters of irradiation. In: Proceedings of the Regional Competition of Fundamental Research Projects, Kaluga: KGIRO; 2016. P. 230-239 (In Russian)
- Isamov NN, Sanzharova NI, Kobyal'ko VO, Kozmin GV, Pavlov AN, Gubareva OS, et al. Using radiation technologies to provide safety of foods of animal origin. *Vse o myase = All about meat*. 2017;1: 11-15 (In Russian)
- Kozmin GV, Geraskin SA, Sanzharova NI. Radiation technologies in agriculture and food industry. Obninsk: VNIIRAE; 2015. 400 p. (In Russian)
- Chernyaev AP, Varzar SM, Belousov AV, Zheltonozhskaya MV, Lykova EN. Prospects of Development of Radiation Technologies in Russia. *Physics of Atomic Nuclei*. 2019;82(5): 425-439 (In Russian)
- Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech. Report Ser. 659. World Health Organization: Geneva; 1981.
- Manual of Good Practice in Food Irradiation. Sanitary, Phytosanitary and Other Applications. Technical Report Series № 481. International Atomic Energy Agency, Vienna; 2015. 85 P.
- Chernyaev AP, Bliznyuk UA, Borshegovskaya PYu, Ipatova VS, Nikitina ZK, Gordonova IK, et al. Treatment of Refrigerated Trout with 1 MeV Electron Beam to Control Its Microbiological Parameters. *Physics of Atomic Nuclei*. 2018;81(11): 1656-1659.
- Barabanov BB, Bezuglov BB, Bryazgin AA, Vlasov AYu, Voronin LA, Korobeynikov MV, et al. Powerful pulse linear electron accelerators ILU and their application in the food industry. In: A collection of round-table reports at the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry; Obninsk: RIRAE; 2016. P. 48-55 (In Russian)
- Klimanov VA, Kramer-Ageev EA, Smirnov VV. Dosimetry of ionizing radiation: a Training manual. Moscow: NRNU MEPhI; 2015. 740 p. (In Russian)
- Guidelines for the Authorization of Food Irradiation Generally or by Classes of Food. ICGFI Document No. 15, Vienna; 1994.
- Pimenov EP, Pavlov AN, Kozmin GV, Spirin EV, Sanzharova NI. Study of the effectiveness of radiation sterilization of plant materials using the GUR-120 installation. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2013;22(4): 37-42 (In Russian)
- Bliznyuk UA, Borshegovskaya PYu, Chernyaev AP, Avdukhina VM, Ipatova VS, Leontev VA, et al. Computer simulation to de-

**Taras V. Chizh**

Russian Institute of Radiology and Agroecology

**Address for correspondence:** Kievskoe shosse 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032; E-mail: taras.chizh@rambler.ru

- termine food irradiation dose levels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;365: 012002.
15. Chernyaev AP, Avdyukhina VM, Bliznyuk UA, Borshegovskaya PYu, Ipatova VS, Leontev VA, et al. Study of the effectiveness of treating trout with electron beam and x-ray radiation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020;84(4): 385-390 (In Russian)
  16. Bliznyuk UA, Avdyukhina VM, Borchegovskaya PYu, Rozanov VV, Studenikin FR, Chernyaev AP, et al. Innovative Approaches to Developing Radiation Technologies for Processing Biological Objects. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018;82(6): 740-744 (In Russian)
  17. Generalova VV, Gursky MN, Gromov AA, Zhanzhora AP, Emelyanenko IA, Kovalenko OI, et al. Standard unit of absorbed dose rate for radiation technologies. In: *Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Current State and Prospects 2018: Proceedings of the International Research and Practice Conference*; 2018 Sept 26-28; Obninsk, Russia. Obninsk: RIRAE; 2018. P. 147-151 (In Russian)
  18. Gromov AA, Zhanzhora AP, Kovalenko OI, Tenishev VP. Food processing by ionizing radiation in Russia Federation. In: *Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Current State and Prospects 2018: Proceedings of the International Research and Practice Conference*; 2018 Sept 26-28; Obninsk, Russia. Obninsk: RIRAE; 2018. P. 151-154 (In Russian)

Received: July 03, 2020

**Aleksandr N. Pavlov** – PhD in Biological sciences, Chief Specialist of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

**For correspondence: Taras V. Chizh** – Junior Researcher of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology (Kievskoe shosse 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032; E-mail: taras.chizh@rambler.ru)

**Aleksey S. Snegirev** – Junior Researcher of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

**Natalya I. Sanzharova** – Doctor of Biological Sciences, Professor, Director of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

**Aleksandr P. Chernyaev** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Accelerator Physics and Radiation Medicine, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University; Head of the Laboratory of Beam Technologies and Medical Physics, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Polina Yu. Borshegovskaya** – Ph.D. in Physico-mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Accelerator Physics and Radiation Medicine, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Victoria S. Ipatova** – Master's Degree student of the Department of Accelerator Physics and Radiation Medicine, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Yuliya A. Dorn** – Postgraduate at the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

**For citation: Pavlov A.N., Chizh T.V., Snegirev A.S., Sanzharova N.I., Chernyaev A.P., Borshegovskaya P.Yu., Ipatova V.S., Dorn Yu.A. Technological process of food irradiation and dosimetric support. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 4. P. 40-50. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50**

## Радиационно-гигиеническая характеристика глобальных выпадений радионуклидов в арктических регионах России (по данным НИИ радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева)

В.В. Омельчук<sup>1,2</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> Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

*В последние годы отмечается активное освоение прибрежных территорий арктических регионов России с размещением на них комплексов по добыче и переработке углеводородов, гражданских и военных объектов. Проведенные СССР и другими ядерными державами во второй половине XX столетия испытания ядерного оружия привели к глобальным радиоактивным выпадениям, в том числе и на прибрежных территориях приарктических регионов СССР. Пять самых мощных в мире ядерных боезарядов испытаны на полигоне Новая Земля в Архангельской области. В Санкт-Петербургском научно-исследовательском институте радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева (до 1994 г. – Ленинградский научно-исследовательский институт радиационной гигиены, далее – Институт) накоплен 30-летний опыт радиационно-гигиенических исследований по оценке последствий испытаний ядерного оружия для районов Крайнего Севера СССР: от разработки аппаратно-методического комплекса для выделения, анализа и измерения низких уровней радиоактивных изотопов как в объектах внешней среды, так и в организме человека, до широкомасштабных радиационно-гигиенических исследований всех звеньев «северной пищевой цепочки» – лишайников, оленей и коренных жителей. Полученные научные данные позволили комплексно оценить вклад радиационного фактора в состояние здоровья населения, проживающего на территориях, охватывающих все российское побережье Северного Ледовитого океана.*

**Ключевые слова:** глобальные радиоактивные выпадения, искусственные радионуклиды, пищевая цепочка «лишайник – олень – человек», удельная активность, дозы облучения.

### Введение

Начало испытаний ядерного оружия ведет отсчет с взрыва 16.07.1945 г. в США атомной бомбы. Паритет между США и СССР в обладании атомным оружием был восстановлен 29.08.1949 г. Всего в СССР с 1949 по 1962 г. проведено более 200 взрывов. Советскому Союзу принадлежит первенство не только в масштабах подобного рода испытаний, но и в мощности ядерных боезарядов – самые мощные взорваны на полигоне Новая Земля, расположенном в Архангельской области [1].

### Особенности глобальных выпадений техногенных радионуклидов на поверхность Земли вследствие испытаний ядерного оружия

В результате проведенных испытаний ядерного оружия образовавшиеся техногенные радионуклиды инжектированы в различные слои атмосферы с последующим выпадением на поверхность Земли из тропо- и стра-

тосферы (так называемые глобальные выпадения). Наибольшую опасность с радиационно-гигиенических позиций представляли Cs-137 и Sr-90, определяющие радиационные последствия в отдаленный период не только в результате испытаний ядерного оружия [2, 3].

По данным [4], общее количество образовавшегося Cs-137 в результате всех проведенных до 1963 г. испытаний ядерного оружия на земле и в воздухе составило 32,74 МКи, Sr-90 – в пределах 17–19 МКи (1 МКи =  $3,7 \cdot 10^{16}$  Бк.). В приведенной выше монографии приводятся материалы из доклада Научного комитета по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН) за 1969 г., а также данные, представленные в 1973 г. американской лабораторией HASL США о глобальных выпадениях, характеризующие динамику отложения на поверхности Земли Cs-137 и Sr-90 в период с 1958 по 1972 г. включительно. Установлено, что показатели годового отложения Cs-137 и Sr-90 и их суммарные величины преобладают

Омельчук Василий Владимирович

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: vasilij.omelchuk@yandex.ru

в северном полушарии Земли, что объясняется не столько размещением мест подрыва большинства ядерных боезарядов, сколько широтной зависимостью выпадений радиоактивных осадков.

По данным [4, 5], количество выпадений Cs-137 и Sr-90 на прилегающей к Новоземельскому атомному полигону территории в 500–600 км в два раза меньше, чем на расстоянии в 2–3 тыс. км от него. Подобная широтная зависимость выпадений Cs-137 и Sr-90 характерна для всего северного полушария и носит глобальный характер.

Выпадения радионуклидов вследствие проведенных испытаний ядерного оружия отличались также и по времени года (максимально – весной и в начале лета), что приводило к выраженным различиям в уровнях загрязнения территорий, коррелирующим более всего с метеоусловиями, прежде всего, с количеством атмосферных осадков – максимум их приходится на Кольский полуостров (675 мм/год), минимум на Якутию (175 мм/год), остальные районы занимают промежуточное положение [6].

Авторы указывают [7, 8], что, несмотря на меньшие (в среднем в 1,5–2 раза) уровни загрязнения почв на протяжении побережья Ледовитого океана (67–70° с.ш.) по сравнению с почвами северного полушария, были обнаружены достоверные (двукратные) различия в уровнях радиоактивного загрязнения почв отдельных северных районов – наибольшие из них отмечены в Мурманской области и Ненецком национальном округе, в восточных районах (Таймыр, Якутия, Чукотка) они наименьшие.

#### **Вклад специалистов Института в изучение последствий глобальных выпадений радионуклидов в арктических регионах России**

Конец 1950-х гг. – начало систематических наблюдений за радиоактивным загрязнением внешней среды глобальными радиоактивными выпадениями.

Первенство среди подобных научных работ принадлежит ученым из США, Канады, ряда скандинавских стран [4] – в 1956 г. Miller C.E., Marinelli Z.D. впервые обнаружили в организме человека Cs-137 глобального (искусственного) происхождения, в 1959 г. Palmer H.E., Hanson W.C., Griffin B.J., Roesch W.C. открыли арктическую (северную) пищевую цепочку миграции радионуклидов глобального происхождения – «лишайник – олень – человек».

Пристальное внимание специалистов к полярным районам объясняется не преобладанием глобальных выпадений техногенных радионуклидов на данных территориях, а феноменом необычайно высокой концентрации осколков деления (прежде всего Cs-137 и Sr-90) в радиоэкологической пищевой цепочке «лишайник – олень – человек» и, следовательно, значительно большего вклада в дозу за счет перорального поступления искусственных радионуклидов [6, 7, 8]. К примеру, вклад в дозу инкорпорированного Cs-137 в 1000 раз больше, чем от внешнего облучения [4, 5].

Начало работ по данной проблематике положено в Институте в 1959 г. На первых этапах основным методом исследования в Институте было определение суммарной радиоактивности в пробах объектов внешней среды, который не позволял проводить углубленный анализ радиоизотопного состава исследуемых объектов. Подобная ситуация потребовала внедрения в практику новейших

на то время методов ядерной физики и радиохимии, разработку аппаратно-методического комплекса с целью выделения, анализа и измерения низких уровней радиоактивных изотопов как в объектах внешней среды, так и в организме человека [9, 10, 11]. За очень короткое время в Институте были разработаны:

- жидкий сцинтилляционный счетчик, для экспресс-определений гамма-излучателей (цезий-137, йод-131) в пробах объектов внешней среды (продуктах питания, воде, молоке и т.д.);

- большой жидкий сцинтилляционный счетчик (БЖСС), предназначенный для прижизненных измерений радиоактивности тела человека;

- ряд переносных приборов: сцинтилляционный бета-счетчик для прижизненного определения инкорпорированного радиоактивного стронция в организме человека; трехканальный анализатор для прижизненного определения радиоактивных изотопов цезия, кобальта, йода; сцинтилляционный радонметр для определения инкорпорированного радия по выдыхаемому радону и др.

- контрольные (эталонные) препараты повышенной точности на стандартных подложках стронция-90, иттрия-90, цезия-137.

Подводя итоги первых 10 лет работы Института [9], М.А. Невструева (тогдашний директор Института) привела ряд важных научных достижений, впервые открытых в ходе научных исследований по тематике изучения последствий глобальных выпадений радионуклидов в арктических регионах России:

- впервые факт повышенного содержания смеси продуктов деления (по суммарной бета-активности) в лишайниках и оленине установлен специалистами Института в 1959 г., что позволило Н.А. Запольской сформулировать положение о наличии в районах Крайнего Севера специфической цепочки миграции радионуклидов (Sr-90) «лишайники – северные олени»;

- в 1961 г. в радиохимической лаборатории (Попов Д.К. и др.), наряду со стронцием-90, впервые обнаружили высокие ( $5\text{--}37 \times 10^{-9}$  кюри/кг) концентрации цезия-137 в единичных пробах оленины, полученных из районов Камчатки, Ненецкого округа, Коми АССР, Иркутской области, Таймырского округа и Мурманской области;

- отобранные для научных целей пробы анализировались в Институте на суммарную гамма-активность в канале цезия-137 и калия-40 (на счетчике с жидким сцинтиллятором Ю.С. Белле), на цезий-137, стронций-90, церий-144, иттрий-91 – радиохимическими методами;

- с 1962 г. в Институте начались первые измерения содержания Cs-137 в организме оленеводов и жителей крупных городов методом гамма-спектрометрии на счетчике О.В. Лебедева;

- в последующем М.С. Ибатуллин доказал, что уровни цезия-137 в организме оленеводов достаточны для их измерения простейшими радиометрами с датчиком от СГ-42 и пересчетным устройством без защиты в полевых условиях.

В ходе выполнения научных работ специалистами Института исследовался вклад в биосферу Крайнего Севера СССР и природных радионуклидов уран-ториевого радиоактивного семейства (Pb-210, Po-210, Rn-226) с определением дозовой нагрузки за счет них у местного населения. Полученные результаты обобщены и опубликованы в монографии [12] и ряде работ [13–16].

Об актуальности данных научных исследований свидетельствуют большое количество сотрудников Института, занимающихся указанной проблематикой (П.В. Рамзаев, М.Н. Троицкая, А.А. Моисеев, Д.К. Попов, Г.И. Мирецкий, А.П. Ермолаева-Маковская, М.С. Ибатуллин, Б.Я. Литвер, А.И. Нижников, Э.М. Крисюк, Э.П. Лисаченко, Л.А. Теплых, В.В. Колесников, Ю.С. Белле, О.В. Лебедев и др.).

Полученные ими научные результаты опубликованы в целом ряде работ, включая монографии [4, 5, 6, 12, 17], защищенные докторские [18, 19, 20] и кандидатские [11, 21–24] диссертации, материалы для НКДАР ООН [25, 26], для Национальной комиссии по радиационной защите (НКРЗ) при Минздраве СССР, для Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР [27–30], сборники «Ядерные взрывы в СССР» [31, 32], научные журналы [33–39], в сборниках научных трудов «Радиационная гигиена», регулярно издаваемых Институтом [40–46], материалах научных конференций [47–52].

Особо следует выделить роль П.В. Рамзаева, внесшего большой вклад в научные исследования по северной тематике [53, 54, 55]. В работе [55] приведена информация о многолетнем руководстве П.В. Рамзаевым научной лабораторией, личном его участии в целом ряде научных экспедиций в районы Крайнего Севера СССР, защите в 1968 г. первой в Институте докторской диссертации [18] по рассматриваемой научной тематике, опубликовании в 1975 г. (совместно с А.А. Мосеевым) монографии [4], послужившей основой материалов НКДАР ООН по вопросам экологии и биологии цезия-137 (Доклад НКДАР ООН за 1977 г.).

1966 г. является отсчетом мировой известности и признания мировым научным сообществом результатов, полученных в Институте, – с доклада коллектива авторов на Международном радиоэкологическом симпозиуме «Radioecological Concentration Processes», который прошел в Стокгольме (Швеция) в апреле 1966 г. [55]. Перечень международных научных форумов по данной проблематике и опубликованных в зарубежных изданиях трудах специалистов Института приведен в [53].

### Итоги исследований по оценке радиационно-гигиенических последствий глобальных выпадений в арктических регионах России за период с 1961 по 1978 г.

Окончание 1960-х и середина 1970-х гг. – время подведения в Институте первых итогов научных исследований по радиационно-гигиенической оценке последствий глобальных выпадений радионуклидов на территориях Крайнего Севера СССР.

В приведенных выше ссылках на защищенные диссертации, изданные монографии, опубликованные итоговые научные публикации представлены результаты исследований с 1961 по 1978 г. всех трех звеньев пищевой цепи, характерной для жителей Крайнего Севера: особенностей и уровней загрязнения Cs-137 и Sr-90 различных видов лишайников (кладоний и центрарий); их удельной активности (соответственно) в мышцах и костях северных оленей; содержания указанных выше радионуклидов в теле и костях местного населения с определением дозовых нагрузок.

Наиболее полно результаты научных исследований всех трех звеньев пищевой цепи за указанный выше период представлены в материалах НКРЗ Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР, опубликованных в 1981 г. [28]. Данные материалы по каждому из звеньев северной пищевой цепи, а также выводы авторов из перечисленных выше работ за более чем 15-тилетний период представлены в таблицах 1–3.

Исследования особенностей миграции осколков деления Cs-137 и Sr-90 в биосфере и избирательного накопления их в лишайниках позволили авторам сделать следующие выводы:

1. Удельная активность Cs-137 и Sr-90 в лишайниках в 1964–1965 гг. достигла максимальных значений (рост с 1961 по 1965 г. в 2–7 раз). После 1966 г. наметился спад (в 2–3 раза), более медленный по сравнению с однолетними растениями. В последующие годы снижение удельной активности Cs-137 проходило с периодом полуочищения около 4–5 лет, и этот период в дальнейшем имеет тенденцию к увеличению.

Таблица 1

Удельная активность цезия-137 и стронция-90 в лишайниках (нКи/кг сухой массы) [28]

[Table 1]

Activity concentration of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in lichen (nCi/kg of the dry mass)

Район [Region]	Дата отбора проб [Sampling date]	Цезий-137 [ <sup>137</sup> Cs]	Стронций-90 [ <sup>90</sup> Sr]
	1961	26±7	–
	IV-62	–	7±4 (28)
	IV-63	48±1 (6)	7±1
	III-65	50±1 (5)	9±1
	XII-65	27±4 (11)	15±2
	IV-66	34±4 (5)	8±1
	XI-66	33±7 (6)	9±1
Мурманская область [Murmansk region]	II-68	27±3 (6)	5±1
	II-69	13±2 (6)	6±0,1
	II-70	14±1 (6)	7±1
	II-71	16±2 (5)	9±1
	II-72	14±1 (3)	8±1
	XI-72	13±2 (4)	4±1
	III-74	17±2 (3)	8±1
	III-75	19±2 (3)	11±1
	IV-78	10±2 (4)	6±0,5

## Reviews

Окончание таблицы 1

Район [Region]	Дата отбора проб [Sampling date]	Цезий-137 [ <sup>137</sup> Cs]	Стронций-90 [ <sup>90</sup> Sr]
Коми АССР [Komi ASSR]	1961	11±3 (2)	–
	X-62	–	4±1 (6)
	VI-64	74±6 (6)	9±1
	III-65	50±1 (5)	9±1
	II-67	–	10±3 (1)
	V-68	12±2 (6)	5±2
	V-69	9±0,1 (3)	5±0,1
	IV-71	8±1 (3)	4±1
	IV-73	9±1 (3)	4±1
	IV-75	15±2 (3)	6±1
Таймырский национальный округ [Taimyr national district]	XI-62	–	3±1 (3)
	II-67	14±1 (11)	6±1
	III-68	13±3 (8)	4±1
	III-69	10±2 (2)	4±1
	IV-71	9±1 (2)	4±1
	III-72	5±1 (3)	5±1
	III-73	8±1 (3)	6±1
Якутская АССР [Yakut ASSR]	XII-65	24±7 (6)	13±4
	XII-66	21±3 (6)	7±1
	III-68	12±5 (3)	7±1
	III-72	11±1 (2)	6±1
	III-73	9±1 (3)	5±1
	IV-76	6±1 (3)	4±1
Чукотский национальный округ [Chukotka national district]	I-67	5 (1)	7
	IV-68	10±2 (2)	5±1
	IV-71	14±1 (3)	8±1
	IV-72	12±2 (4)	7±1
	III-73	9±1 (3)	3±1
	IV-IX-76	7±1 (10)	4±1
	IV-78	11±1 (5)	3±1

– численные значения приведены в применявшихся в период исследований единицах (1 нКи=37 Бк);  
– средние значения ± стандартная погрешность; в скобках – число проб.

[– Values are given in the units used in the time of the survey (1 nCi = 37 Bq)  
– mean values ± SD (number of samples)].

### Удельная активность Cs-137 в мышцах и Sr-90 в костях северных оленей (нКи/кг сырой массы) [28]

Таблица 2

#### Activity concentration of <sup>137</sup>Cs in muscles and <sup>90</sup>Sr in bones of the reindeers (nCi/kg of the raw mass)

[Table 2]

Район выпаса [Region]	Дата забоя [Date of sampling]	Cs-137	Sr-90	С.е. (стронциевые единицы) [Strontium units]
Мурманская область [Murmansk region]	1961	24 (1)	40 (1)	300
	VI-62	33±2 (3)	51±15 (4)	390±125
	I-63	39±2 (3)	71±10 (4)	545±73
	V-63	48±7 (2)	84±18 (3)	643±12
	II-64	80±3 (6)	147±10 (8)	1080±100
	VII-64	22±6 (3)	145±30 (3)	1111±27
	II-65	97±4 (11)	134±8 (11)	1414±74
	X-65	74±4 (12)	152±7 (12)	1270±69
	IV-66	79±4 (13)	210±20 (15)	1800±75
	I-68	45±1 (19)	145±6 (17)	1100±41
	XII-68	45±2 (15)	55±1 (7)	566±90
	XII-69	38±2 (11)	66±4 (11)	515±27
	II-71	37±3 (13)	71±4 (13)	480±20
	III-72	42±5 (8)	39±2 (5)	343±10
	I-73	29±8 (14)	42±5 (6)	316±11
	III-74	37±2 (9)	40±4 (9)	309±17
	I-75	28±3 (6)	25±2 (6)	303±14
	IV-77	21±2 (4)	30±3 (5)	290±40
	XI-77	16±3 (7)	25±5 (7)	270±40
	III-78	17±2 (9)	30±4 (9)	280±30

Район выпаса [Region]	Дата забоя [Date of sampling]	Cs-137	Sr-90	С.е. (стронциевые единицы) [Strontium units]
Коми АССР [Komi ASSR]	XI-1961	21±1 (57)	44±10 (29)	–
	V-62	16±2 (4)	55±10 (27)	400±40
	V-63	33±2 (4)	50±6 (8)	427±60
	VI-63	38±4 (6)	–	–
	IX-63	23±1 (4)	51±6 (4)	429±11
	I-64	45±10 (4)	–	–
	V-64	61±8 (4)	93±24 (11)	1109±73
	VII-64	12±2 (3)	–	–
	V-65	81±7 (12)	126±11 (8)	1050±21
	X-66	30±3 (19)	64±5 (19)	530±25
	V-68	28±1 (9)	82±14 (7)	620±109
	I-69	22±1 (7)	29±5 (7)	306±47
	XII-70	17±1 (10)	36±3 (10)	235±10
	XI-72	14±2 (7)	26±3 (7)	284±21
	I-75	20±2 (6)	14±2 (6)	158±12
Таймырский национальный округ [Taimyr national district]	1961	8 (1)	–	–
	IV-62	4±1 (2)	18±4 (2)	162±17
	XII-62	13±3 (3)	39±10 (2)	350±50
	XII-64	22±2 (12)	41±1 (13)	465±24
	I-65	36 (1)	–	–
	X-66	16±2 (14)	77±6 (24)	580±118
	II-67	20±3 (4)	–	–
	XII-67	18±2 (10)	69±5 (14)	526±39
	III-68	38±1 (4)	–	–
	XII-68	17±2 (9)	41±6 (14)	433±45
	XII-70	17±2 (11)	32±3 (10)	290±22
	XII-71	19±2 (6)	36±3 (6)	330±24
	XII-72	15±1 (10)	19±2 (9)	260±14
XII-74	11±3 (8)	24±3 (8)	258±14	
XII-76	7±2 (5)	17±3 (5)	207±15	
Якутская АССР [Yakut ASSR]	1959	–	–	190±24 (2)
	XI-64	17±3 (9)	65±8 (9)	540±33
	XI-65	12±1 (10)	75±5 (10)	600±20
	XI-66	6±1 (18)	83±10 (18)	710±110
	XII-67	8±1 (4)	69±11 (3)	526±87
	XII-68	6±1 (7)	37±3 (7)	331±18
	XI-71	7±1 (10)	25±6 (10)	221±13
	XI-72	6±1 (12)	39±3 (12)	330±15
	XII-76	7±4 (6)	18±5 (6)	106±28
Чукотский национальный округ [Chukotka national district]	VI-62	8±1 (10)	53±8 (19)	442±10
	XII-64	25±2 (10)	88±8 (10)	615±13
	XI-1966	21±3 (6)	69±11 (15)	520±20
	I-67	24±4 (8)	–	–
	XII-67	18±1 (3)	63±11 (3)	481±83
	XII-69	15±1 (28)	52±4 (28)	390±21
	XII-70	15±1 (17)	38±3 (17)	248±19
	XI-71	12±4 (10)	33±9 (3)	236±30
	XII-72	13±1 (15)	22±3 (14)	218±15
	XII-75	10±1 (31)	23±2 (24)	197±14
	IV-76	11±3 (7)	22±7 (7)	205±21
VII-78	–	21±4 (3)	198±15	

## Содержание инкорпорированного Cs-137 у пастухов-оленеводов, нКи [28]

[Table 3]

Concentration of incorporated  $^{137}\text{Cs}$  in the reindeer herders, nCi [28]

Район [Region]	Дата обследования [Date of survey]	Число оленеводов [Number of deer-herders]	Содержание Cs-137, нКи [Concentration of $^{137}\text{Cs}$ , nCi]	
			во всем организме [In the whole body]	на 1 кг массы тела [per 1 kg of body mass]
Мурманская область [Murmansk region]	VI - 1962	2	1200±500	20±7
	I - 1963	3	1200±300	22±5
	II - 1964	25	1900±170	31±3
	VII - 1964	23	1500±140	24±3
	III - 1965	29	2800±140	45±3
	X - 1965	28	1700±100	27±2
	IV - 1966	21	3300±200	51±3
	XI - 1966	18	2200±140	35±3
	II - 1968	22	2100±170	33±2
	II - 1969	20	2020±165	31±3
	II - 1970	13	1600±250	25±3
	II - 1971	12	1553±109	23±2
	III - 1972	22	1080±64	18±1
	III - 1974	14	971±143	14±2
	III - 1975	16	890±110	14±3
	III - 1977	9	790±75	12±1
	IV - 1978	17	720±55	11±1
	III - 1979	20	580±40	9±1
	Коми АССР [Komi ASSR]	VII - 1962	3	230±50
XI - 1962		5	350±100	5±2
V - 1964		26	1500±100	24±2
II - 1967		7	1500±100	21±2
V - 1968		19	1600±130	24±2
V - 1969		19	1245±110	19±1
V - 1975		10	617±50	9±1
Таймырский национальный округ [Taimyr national district]	VII - 1962	2	330±10	5±1
	XII - 1962	3	330±80	4±1
	I - 1965	13	800±100	13±1
	II - 1967	13	700±40	12±1
	III - 1968	17	900±150	13±1
	IV - 1969	17	1000±125	18±2
	IV - 1971	9	504±39	8±1
	III - 1972	7	260±34	5±1
	III - 1973	14	298±9	5±1
Якутская АССР [Yakut ASSR]	IX - 1975	9	348±72	6±1
	IV - 1977	7	398±20	6±1
	I - 1965			
	XII - 1965	7	400±50	5±1
	I - 1967	6	400±70	5±1
	III - 1968	12	460±10	8±1
	IV - 1969	13	400±35	6±1
Чукотский национальный округ [Chukotka national district]	III - 1972	6	470±30	8±1
	III - 1973	12	340±33	5±1
	IV - 1977	10	322±11	5±1
		3	260±30	4±1
	I - 1965	14	900±100	14±1
Чукотский национальный округ [Chukotka national district]	I - 1967	18	1700±20	25±2
	IV - 1968	12	1200±130	17±2
	IV - 1971	16	830±19	13±1
	IV - 1972	12	770±47	12±1
	IV - 1973	11	486±17	8±1
	XI - 1975	10	393±56	5±1
	IV - 1976	6	548±39	6±2

2. Не более двух-трехкратные различия в уровнях радиоактивного загрязнения различных районов (от Мурманской области до Чукотки), что сопоставимо с данными по США (Аляска), Финляндии, Норвегии, Швеции, Дании, Канаде и подтверждает глобальный характер радиоактивных выпадений.

3. Лишайники загрязнены искусственными (Cs-137 и Sr-90) и природным (Po-210) радионуклидами в 5–10 раз больше, чем однолетние травы, растущие в тундре, что объясняется высокими значениями сорбционной поверхности лишайников на единицу массы, многолетним характером роста, воздушным типом питания.

4. Особенности загрязнения лишайников осколочными радионуклидами:

- из-за сепарации Cs-137 от Sr-90 происходит сдвиг их соотношения до 4–10 (к примеру, в глобальных выпадениях оно равно 1,6–1,7), что приводит к преимущественной роли в первом звене пищевой цепи Cs-137 по сравнению со Sr-90;

- установлен так называемый «верхушечный эффект», проявляющийся в преобладании в 5 раз уровней удельной активности в верхней части лишайников по сравнению с их основаниями, что требует соответствующих строгих методических подходов к отборам проб, т.к. в противном случае их несоблюдение может привести к флуктуации данных, не связанных с истинной динамикой удельной активности исследуемых нуклидов.

5. Уровни загрязнения Cs-137 и Sr-90 арктических регионов России, пищевой цепочки «лишайник – олень – человек» и, соответственно, дозы облучения коренного населения не зависят от близости к ядерному полигону на Новой Земле, а коррелируют более всего с количеством атмосферных осадков.

Выводы, полученные авторами в результате анализа результатов исследования удельной активности Cs-137 в мышцах и Sr-90 в костях северных оленей:

1. Обнаружены существенные различия в показателях удельной активности Cs-137 и Sr-90 в мышцах и костях оленей по всему побережью. Максимальные значения отмечены в период наибольших глобальных выпадений осколков деления (в 1956–1966 гг.) в Мурманской области, минимальные – на севере Якутской АССР (в 5–7 раз достоверно ниже). В крайне восточных районах СССР (на Чукотке) отмечен подъем в 2 раза по сравнению с севером Якутии.

2. Уровни удельной активности Cs-137 и Sr-90 в мышцах и костях оленей, помимо географических вариаций, определяются также структурой пастбищ, рационом оленей. Различия в поедаемом корме приводили к разным значениям соотношения удельной активности мышц (Cs-137) и костей (Sr-90). В период наибольших уровней загрязнения в Мурманской области это значение равнялось 0,71, в Якутской АССР (в районе Оетунг) – 0,26, все остальные районы занимали промежуточное значение.

3. Очищение мяса оленей от Cs-137 до 1968 г. происходило практически одинаково во всех районах с эффективным периодом полувыведения ( $T_{1/2}$  эф.), равным около 2,5 лет, после 1968 г. этот показатель возрос до 7–8 лет (за исключением Коми АССР, что связано, по видимому, с особенностями выпаса оленей). Характерной особенностью уровня содержания Cs-137 в оленине является резко выраженная сезонность: максимальные

значения в конце зимнего выпаса (май), минимальные – в конце лета (август). По Коми АССР в 1964 г. за 3 летних месяца отмечен 18-кратный спад удельной активности с последующим подъемом к началу 1965 г.

4. В мышцах и других мягких тканях оленей содержание Sr-90 оказалось почти в 1000 раз меньше, чем в костях. Очищение костной ткани оленей от Sr-90 после периода максимума (1956–1966 гг.) шло по  $T_{1/2}$  эф. около 4 лет. После 1972 г. по районам Таймыра, Чукотки достоверного снижения удельной активности Sr-90 в костях северных оленей не регистрировалось.

5. Определены причины резко выраженной сезонности удельной активности Cs-137 в оленине:

- существенное сезонное изменение уровней радиоактивного загрязнения кормов – значительный рост при переходе на лишайниковые пастбища с осени по май (зимой лишайники являются основным кормом для оленей) и снижением (минимальные значения) к концу лета (август);

- короткий биологический период полувыведения радионуклида  $T_{биол.}$  из организма оленей – в среднем около 22 суток.

6. На примере 6 районов (3 в Мурманской области и 3 в Якутской АССР) выявлен высокий коэффициент корреляции между удельной активностью Cs-137 в оленине и лишайниках – 0,87 ± 0,10.

7. Удельная активность Cs-137 в оленине в районах Крайнего Севера СССР в пределах одного порядка не отличалась от таковой в других странах северного оленеводства (США, Финляндии, Норвегии, Швеции, Канады). Содержание Cs-137 в оленине в Мурманской области совпадало с данными в соседней Финляндии, а данные по Чукотке не отличаются от показателей по Аляске. Таким образом, полученные в Институте данные совпали с данными зарубежных исследователей, что позволило составить представление о динамике Cs-137 в оленине для всего побережья Северного Ледовитого океана.

8. Эквивалентная доза в организме оленей от Cs-137 при значениях удельной активности в пределах от 10 до 100 нКи/кг равна 70–700 мбэр на все тело. Значительно большую дозу олени получали на скелет от Sr-90 (до 10–30 бэр в год) и естественного Po-210 (свыше 10 бэр в год). В результате в организме северного оленя формируется доза, равная или превышающая предельно допустимую для профессионалов в течение всей жизни и всей эволюции. Авторы отметили, что, возможно, такая доза для оленя – норма существования и что биологическая роль указанной дозы требует более тщательного изучения.

В ходе исследований [4, 25, 28, 29] установлено, что рацион коренных жителей Крайнего Севера носит выраженный сезонный характер с преобладанием оленьего мяса (особенно в зимний период) – от 85 до 90% (10% – снег, используемый для питья и приготовления пищи, рыба, дикая птица). В зависимости от объемов поедаемой оленины и, соответственно, поступления и накопления искусственных радионуклидов в организме (прямо пропорциональная зависимость), местное население было разделено на три группы:

1. Пастухи-оленоводы, члены их семей (10–100 тыс. чел). Среднесуточное потребление оленины – 250 г (мышцы). У мужчин-оленоводов в зимний период

количество поедаемой оленины достигало максимально до 1 кг в день.

2. Жители сельских поселков и небольших городов (200 тыс.). Среднесуточное потребление оленины – 20–100 г.

3. Жители крупных городов (Мурманск, Воркута, Норильск, Магадан – более 1 млн чел.). Потребление оленины нерегулярно, от случая к случаю.

Из приведенных выше групп пастухи-оленьеводы и члены их семей – критическая. Результаты определения инкорпорированного Cs-137 у пастухов-оленьеводов приведены в таблице 3.

Выводы по результатам определения уровней инкорпорированного Cs-137 у обследованных лиц:

1. Коэффициент корреляции между удельной активностью Cs-137 в оленине и в организме оленеводов равен  $+0,88 \pm 0,05$ . По содержанию данного радионуклида в выделениях установлен «эквивалент» суточного потребления оленины: в среднем по всем районам Крайнего Севера СССР в организм оленеводов ежедневно поступало столько Cs-137, сколько его содержалось в 230 г мышц оленей (в зимний период наибольшее потребление оленины достигало 1 кг/сутки).

2. В 1966 г. выявлены максимальные уровни удельной активности Cs-137 у жителей критической группы (оленьеводов и членов их семей). В первой, критической группе у мужчин – в диапазоне 0,5–4,8 мкКи, у женщин – 0,25–2,4 мкКи, у детей – 0,1–0,96 мкКи. Значения удель-

ной активности Cs-137 у взрослых второй группы было в диапазоне 0,03–0,5 мкКи, а у жителей третьей группы – не более чем в 2 раза отличается от значений у жителей центральных районов СССР. Наибольший уровень содержания Cs-137 зарегистрирован в 1965–1966 гг. в организме оленеводов Мурманской области (в 8 раз больше, чем у коренных жителей Якутии).

3. В среднем содержание Cs-137 в организме оленеводов достигло максимальных значений в 1966 г., спустя год после наблюдений наибольших уровней радионуклида в оленине. Сдвиг во времени значений инкорпорированного Cs-137 у пастухов-оленьеводов объясняется временем, необходимым для установления равновесия в обмене Cs-137 в организме человека.

4. Динамика уровней инкорпорированного Cs-137 у оленеводов Мурманской области показывает, что после достижения максимальных значений в 1966 г. снижение нуклида в первые годы шло с  $T_{1/2}$  эф., равным 2 года, затем в 1968 г. период полуснижения замедлился до 5 лет. Последующее уменьшение инкорпорированного Cs-137 шло с периодом  $T_{1/2}$  эф., равным 6 лет. По остальным районам  $T_{1/2}$  эф. составило по Коми АССР 4 года, по Таймыру 6 лет, по Якутии 9 лет, по Чукотке 4 года. Для жителей средних широт  $T_{1/2}$  эф. с 1964 по 1968 г. не превышал 2,3 года.

Большого объема научных данных в Институте по содержанию Sr-90 в скелете коренных жителей Крайнего Севера на исследуемый период времени (в отличие от таковых по Cs-137) нет. В таблице 4 приведены факти-

Таблица 4

## Содержание Sr-90 в костях человека, стронциевые единицы

[Table 4]

Concentration of  $^{90}\text{Sr}$  in the human bones, strontium units

Место и время отбора проб [Region and date of sampling]	Возраст, лет [Age, years]	Вид кости [Type of bone]	Число проб [Number of samples]	Стронций-90, с.е. (стронциевые единицы) [ $^{90}\text{Sr}$ , strontium units]
Мурманская область [Murmansk region]	39	Ребро [Ribs]	1	25,6
Чукотский национальный округ [Chukotka national district]	40	Ребро [Ribs]		
	40-61	- « -	1	23,8
	1971	- « -	4	11,7 (5,4–15,8)
	1972	- « -	8	20,0 (7,5–38,8)
	1973	- « -	6	16,2 (5,1–37,5)
	1974	- « -	3	17,8 (5,4–28,2)
	1975	- « -	9	16,5 (4,7–21,5)
	1976	- « -		
СССР [USSR]	19	Нормализовано на весь скелет [Normalized for the whole skeleton]	694	1,2
	1968	- « -	1142	1,2
	1969	- « -	1249	1,4
	1970	- « -	867	1,3
	1971	- « -		
Канада [Canada]	- « -	Позвонки [spine]	38	2,7
	1968	- « -	37	2,2
	1969	- « -		
Норвегия [Norway]	- « -	Позвонки [spine]	90	3,4
	1969	- « -	84	3,7
	1970	- « -	46	3,3
	1971	- « -	77	3,5
	1972	- « -	33	2,7
	1973	- « -	54	2,4
	1974	- « -	100	2,8
	1975	- « -		

ческие данные содержания Sr-90 в костной ткани оленеводов и коренных жителей, отобранных при анатомических вскрытиях трупов жителей Мурманской области и Чукотки. Материал по жителям СССР, Канады и Норвегии авторы представили по данным из отечественных и зарубежных источников [28].

По приведенным в таблице 4 данным авторами сделаны следующие выводы:

1. Удельная активность Sr-90 в костях коренных жителей Крайнего Севера во много раз больше аналогичных значений у людей, не связанных с оленеводством, что не находит своего логичного объяснения, т.к. поступление Sr-90 в организм пастухов-олeneводо-в с рационом всего в 2–3 раза превышает подобные значения у людей, не имеющих отношения к северной цепочке.

2. Авторы отмечают, что сопоставление литературных данных, характеризующих содержание Sr-90 в пищевых рационах и костях людей, не позволило установить корреляцию между ними. Данное обстоятельство подчеркивает, что на тот момент факторы, определяющие накопление Sr-90 в организме, были не до конца изучены. Высказывались предположения, что причинами могут быть различия в параметрах метаболизма в организме человека Sr-90, поступающего у жителей средних широт с хлебом, а у оленеводов – с олениной.

3. Основным источником поступления Sr-90 в организм является поедание растущих оленьих рогов и размягченных костей, особенно при специфической варке бульона в предельно малом количестве воды (при приготовлении 3–4 л бульона используется 4–5 кг оленины). Расчеты показали, что в 300–350 мл такого бульона содержится около 125 пКи Sr-90.

4. Вклад Sr-90 при поедании местным населением рыбы, куропаток и гусей (особенно в весенний период) менее значим, чем оленины, что объясняется авторами не только сезонностью, но и меньшим их загрязнением в периоды наибольших уровней глобальных выпадений по сравнению с олениной.

5. По данным регулярного ежегодного обследования одних и тех же людей в Мурманской области, авторами по анализу содержания Cs-137 и Sr-90 в суточных выделениях рассчитан эффективный период полураспада рациона ( $T_{1/2}$  эф.). Соответственно, для Cs-137 он составил 3 года в период с 1965 по 1969 г. и около 9 лет с 1969 по 1972 г., а для Sr-90 данный временной промежуток был более равномерным – в среднем 4 года.

Обобщенные результаты специалистов Института по научным данным за период 1961–1978 гг. [4, 5, 7, 28]:

1. Повышение дозовой нагрузки (в 10–100 раз) отмечено у отдельных лиц населения Крайнего Севера СССР, связанных с пищевой цепочкой «лишайник – олень – человек».

2. Выявлена замедленная (в 2–5 раз) скорость очищения указанной выше цепочки по сравнению с другими наземными цепочками (к примеру, травы очищаются от Cs-137 вслед за атмосферой с  $T_{1/2}$  эф., равным 9–12 месяцам);

3. Доминирование (в 100 раз) внутреннего облучения оленеводов от Cs-137 по сравнению с Sr-90 на период всего очищения биосферы, включая и почвенный (корневой) его период.

4. Sr-90 облучает скелет пастухов-олeneводо-в в 10–20 раз более интенсивно, чем жителей средних широт.

5. Для прогнозирования уровней загрязнения Cs-137 в цепочке «лишайник – олень – человек» можно использовать эмпирическое соотношение: 1 мКи Cs-137 на км<sup>2</sup> максимумально в равновесных условиях обуславливает загрязнение лишайников 1 нКи Cs-137 на 1 кг сухого вещества, 2 нКи на 1 кг мышц оленины, 0,5 нКи в суточном рационе оленевода; 1 нКи/кг тела человека создает эквивалентную дозу облучения всего организма, равную 11 мбэр в год.

6. По эквивалентной дозе у пастухов-олeneводо-в Cs-137 представляет в 10 и более раз большую радиационно-гигиеническую значимость, чем Sr-90.

7. Эффективная доза (с учетом стохастических последствий, приравненных к облучению всего тела, а также значений взвешивающих факторов по МКРЗ-26) на два порядка выше от вклада Cs-137, чем от Sr-90.

8. Эффективная доза внутреннего облучения за счет Cs-137 у коренного населения составляет основную долю техногенного облучения. Дозовые нагрузки от данного радионуклида в период максимума глобальных выпадений (1966 г.) и затем через 5 и 10 лет составляли в среднем 2400, 1200 и 600 мкЗв/год соответственно. Содержание Sr-90 в скелете жителей Крайнего Севера создает эффективную дозу на весь организм в среднем 30 мкЗв/год.

9. Самая высокая мощность эквивалентной дозы, отмеченная у оленеводов Мурманской области, достигала в 1966 г. 8000 мкЗв/год (800 мбэр/год), что в общем в 100 раз выше, чем у жителей крупных городов Севера СССР.

#### **Окончание XX столетия в Институте ознаменовалось подведением итогов 30-летних исследований радиационной обстановки в арктических регионах России**

По полученным результатам защищены докторские диссертации [19, 20], специалистами Института в соавторстве опубликован ряд монографий [5, 6, 17], в которых представлены материалы не только по динамике содержания основных дозообразующих техногенных радионуклидов (Cs-137 и Sr-90) во всех звеньях северной пищевой цепочки «лишайник – олень – человек» за весь период наблюдений с 1961 по 1992 г., но и указаны дозовые нагрузки, дана гигиеническая характеристика показателей здоровья коренных жителей Крайнего Севера СССР. Полученные авторами результаты представлены в таблице 5.

Выводы авторов по данным 30-летних радиационно-гигиенических исследований пищевой цепочки «лишайник – олень – человек» [5]:

1. Во всех оленеводческих регионах происходит очищение пищевой цепочки: от 3–4-кратного в Мурманской области и Ненецком АО до 7–8-кратного уменьшения в Коми и на Чукотке (на Чукотке близится к завершению);

2. Изменение соотношения Cs-137 и Sr-90 в западных регионах Заполярья (с 3–4 к 1 до 18–20 к 1) объясняется дополнительными глобальными выпадениями Cs-137 после аварии на ЧАЭС в 1986 г., приведшими к локальным загрязнениям Северо-Западных субарктических территорий (до 15% к глобальному уровню);

3. Содержание Sr-90 во всех звеньях цепи по всем регионам почти равное, и к середине 1990-х гг. оно достигло равновесного уровня.

4. Эффективная доза (ЭД) за счет внутреннего облучения Cs-137 у оленеводов составляет основную долю техногенного облучения: 1966 г. (период максимума) – около

Удельная активность\* Cs-137 и Sr-90 \*\* (Бк/кг) и соотношение их содержания в звеньях экологической цепочки «лишайник-олень-человек» за период с 1961 по 1994 г. [5]

[Table 5]

Activity concentration of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr (Bq/kg) and ratio of their concentration in the links of the ecological chain «lichen-raindeer-man» in 1961-1994]

Район [Region]	Лишайник [Lichen]		Олень [Raindeer]		Человек*** [Human]							
	1961–1983		1991–1994		1961–1983		1991–1994					
	Cs-137/Sr-90 и их соотношение [ <sup>137</sup> Cs/ <sup>90</sup> Sr and their ratio]											
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Мурманская обл. [Murmansk region]	816 295	3 1	232 12	18 1	1480 2966	1 2	300 40	7.5 1	888 104	9 1	77 8	8 1
Ненецкий АО [Nenetskiy AO]	814 222	4 1	248 20	20 1	1000 1520	1 1,5	330 51	6.5 1	481 98	5 1	60 8	8 1
Ижемский (Республика Коми) [Izhemskiy (Komi republic)]	814 222	4 1	96 17	6 1	1000 1525	1 1,5	90 35	2.5 1	481 98	5 1	32 7	4.5 1
Чукотский АО [Chukotka AO]	370 185	2 1	56 20	3 1	555 1500	1 3	80 60	1.3 1	518 100	5 1	22 7	3 1

1. Удельная активность радионуклидов: в числителе – цезия-137, в знаменателе – стронция-90;

2. Их соотношение;

\* – 30% > m > 20%;

\*\* – у оленей и человека в костной ткани;

\*\*\* – среднее значение максимальных значений удельной активности у оленеводов по всем обследованным населенным пунктам;

\*\*\*\* – в 1961–1983 гг. давалась единая оценка по Коми-Ненецкому округу.

[1. Activity concentration of radionuclides: <sup>137</sup>Cs/<sup>90</sup>Sr

2. Their ratio;

\*- 30% > m > 20%;

\*\*for raindeers and humans in bone tissue

\*\*\*mean values of maximum activity concentrations for the raindeer herders in all residential places

\*\*\*\* the joint assessment was performed in the whole Komi-Nenetskiy district in 1961–1983].

2,4 мЗв/год., 1971 г. – около 1,2 мЗв/год, 1976 г. – около 0,6 мЗв/год. В 1966 г. у оленеводов Мурманской области зарегистрированы максимальные значения удельной активности Cs-137 – 5 мкКи на весь организм, что предопределяло ЭД около 8 мЗв/год (800 мБэр/год), что в 100 раз выше, чем у жителей крупных городов севера СССР, не потреблявших оленины;

5. Эффективная доза на организм за счет Sr-90 в скелете составляет в среднем 30 мкЗв/год.

6. Значимый вклад в дозу оказывают природные (естественные) радионуклиды Po-210 и Pb-210 – значения ЭД порядка 1 мЗв/год.

7. Средневзвешенные (с учетом численности населения по районам) годовые эффективные индивидуальные дозы у населения районов Крайнего Севера России за счет глобальных выпадений (внутреннее облучение) были в диапазоне от 0,06 до 0,22 мЗв/год;

Авторами [5] на базе оценки влияния малых доз радиации по сравнению с другими факторами риска в регионе проведена оценка здоровья коренных народов Крайнего Севера в связи с радиационным фактором. Оценка потенциального вреда глобальных выпадений для коренного населения Крайнего Севера России проведена по показателям общей смертности местного населения, рассчитанной на 1000 чел. на протяжении 30-летнего периода наблюдений (табл. 6).

Выводы авторов по данным 30-летних радиационно-гигиенических исследований общей смертности корен-

ного населения наблюдаемых районов Крайнего Севера [5]:

1. Показатели смертности от всех причин населения Крайнего Севера не только превышают таковые по стране на 40–50%, но и их динамика имела необычный характер: по РФ отмечается тенденция к неуклонному росту к 1990-м гг., тогда как в наблюдаемых районах с конца 1960-х гг. отмечается 1,5–2-кратный подъем смертности вплоть до 1980-х гг. с последующим спадом к 1990-м гг.

2. 60-я Публикация МКРЗ постулирует следующую зависимость доза-эффект: ЭД 10 тыс. чел.Зв определяет гибель 730 чел. от раковых болезней и наследственных дефектов. Исходя из расчета для 16 тыс. коренных жителей Ненецкого округа, средняя индивидуальная эффективная годовая доза за 32 года равна 0,6 мЗв, потери от радиационного фактора при таком подходе составят 22 человека. При наблюдавшемся с 1961 по 1991 г. уровне годовых показателей смертности и их флюктуациях величина такого порядка никакими статистическими методами выявлена быть не может.

3. Авторами высказано предположение о появлении в 1960–1970-х гг. в сфере обитания жителей Крайнего Севера (особенно в европейской части) некоего фактора или комплекса факторов, увеличивающих риск смерти. К ним относится и дозовая нагрузка от искусственных радионуклидов глобальных выпадений.

Анализ структуры смертности коренного населения в наблюдаемых районах Крайнего Севера (особенно доли

Показатели общей смертности (на 1000 чел.) коренного населения наблюдаемых районов Крайнего Севера за 30-летний период наблюдений [5]

[Table 6]

Indicators of the mortality (per 1000 persons) for the native inhabitants of the surveyed regions of the Far North for the 30-year period of surveillance]

Период наблюдения [Time period]	Районы наблюдения [Regions of surveillance]				
	Мурманская область [Murmansk region]	Ненецкий АО [Nenetsk AO]	Республика Коми [Republic of Komi]	Чукотский АО [Chukotka AO]	РФ [Russian Federation]
1961–1965	8,6	9,3	9,0	28,2	7,1
1966–1970	8,8	10,3	8,9	25,4	7,7
1971–1975	13,6	12,9	10,2	24,7	8,5
1976–1980	17,0	12,5	12,2	20,5	9,3
1981–1985	14,6	11,5	13,0	17,8	10,2
1986–1990	13,2	9,0	11,3	11,6	10,7
1991–1992	11,2	9,2	10,7	10,8	–

онкологических заболеваний и смертельных генетических повреждений как потенциально возможных радиационных последствий глобальных выпадений) позволил авторам сделать следующие выводы:

1. 40–70% случаев гибели связаны с сердечно-сосудистыми заболеваниями и несчастными случаями, 10–20% – с онкологическими заболеваниями, на долю смертельных генетических повреждений приходится 1–2%.

2. Злокачественные опухоли в структуре смертности коренного населения Крайнего Севера сравнимы с таковыми по СССР (около 18%). По показателям смертности на 1 тыс. населения – в 2 раза выше, чем в бывшем СССР. Достоверного увеличения этого показателя в динамике за 20 лет не регистрировалось.

3. Состояние здоровья аборигенов на Европейском Севере по основным показателям соответствует среднероссийскому уровню, а в Азиатском секторе Арктики у коренных жителей отмечается самая низкая в стране продолжительность жизни, самая высокая пораженность раком пищевода и опухолями центральной нервной системы.

4. Авторы выделяют нерадиационные факторы, влияющие на состояние здоровья коренных народов Крайнего Севера России [6, 20]:

- неблагоприятные климатические условия, зачастую экстремального характера;

- примитивность бытовых условий, монотонность питания с недостатком овощей и фруктов;

- высокая роль алкоголя в естественной убыли населения: первопричиной 10–17% случаев всех случаев смерти, в том числе суицидов (около 4%), несчастных случаев (от 8 до 10%), является алкоголь. Около 2% всех случаев смерти на Крайнем Севере сопровождается диагнозом «Алкогольная интоксикация»;

- загрязнение среды обитания стойкими токсическими веществами с накоплением их в организме при потреблении традиционной пищи.

В начале 2000-х научные исследования последствий глобальных выпадений в арктических регионах России проводились специалистами Института совместно с исследователями из Норвегии, Дании, Нидерландов, Финляндии, Швеции, Великобритании. Указанные рабо-

ты выполнялись в рамках большого международного проекта AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). От Института в них принимали участие П.В. Рамзаев, Г.И. Мирецкий, В.Н. Шутов, М.И. Балонов, Г.Я. Брук, В.Ю. Голиков, В.Н. Шутов, И.Г. Травникова. Полученные результаты опубликованы в ряде отчетов [56, 57] и научных статей [58-60].

### Заключение

Глобальные выпадения радиационно значимых радионуклидов Cs-137 и Sr-90 после проведенных испытаний ядерного оружия привели к изменению радиационно-гигиенической обстановки на Крайнем Севере России, обусловленному феноменом концентрации указанных выше изотопов в пищевой цепочке «лишайник – олень – человек». Несмотря на увеличение дозовых нагрузок в пиковый период и последующие годы, радиационно-гигиеническая оценка здоровья коренных народов Крайнего Севера России в связи с радиационным фактором находится в области оценки эффективности малых доз радиации по сравнению с другими факторами риска в регионе. Дозовые нагрузки на аборигенов Севера от техногенной компоненты значимо не влияют на уровень общей естественной убыли населения и смертности по основным причинам на фоне естественных флюктуаций показателей, обусловленных другими факторами.

За последние 35 лет (по данным на 2006 г.) сформировалась выраженная тенденция к уменьшению дозовых нагрузок, получаемых коренным населением Севера через пищевую цепь «лишайник – олень – человек» за счет снижения доз от искусственных радионуклидов (главным образом от цезия-137 в 15–50 раз). Уровни, структура и временная динамика смертности коренного населения от злокачественных заболеваний свидетельствуют об отсутствии добавочного онкологического риска, связанного с фактическими дозами ионизирующего излучения среди коренного населения Севера РФ [20].

Результаты работ и выводы, полученные специалистами Института при исследовании глобальных выпадений на территории Крайнего Севера, не потеряли свою актуальность и по настоящее время. Они использовались для создания современной модели поведения радионук-

лидов цезия и стронция в арктических экосистемах, анализа последствий так называемых «мирных» подземных ядерных взрывов, изучения последствий Чернобыльской аварии и разработки мер защиты населения, а также радиационно-гигиенической оценки особенностей радиоактивного загрязнения территорий на Дальнем Востоке России после аварии на АЭС «Фукусима-1» [55].

### Литература

1. Ядерные взрывы в СССР. Северный испытательный полигон: справ. инф. / под ред. акад. В.Н. Михайлова. 2-е изд. перераб. и доп. СПб: НПО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, 1999. 163 с.
2. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб: НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2016. Т. 1. 448 с.
3. Романович И.К., Балонов М.И., Барковский А.Н. и др. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / под ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. 336 с.
4. Моисеев А.А., Рамзаев П.В. Цезий-137 в биосфере. М.: Атомиздат, 1975. 184 с.
5. Мирецкий Г.И., Рамзаев П.В., Захарченко М.П., Лучкевич В.С. Радиационный фактор на Крайнем Севере России. СПб: МЗ РФ, 1999. 204 с.
6. Шубик В.М., Мигунов В.И., Стамат И.П. Здоровье коренных жителей Крайнего Севера. (радиационно-гигиенические аспекты). СПб: НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2004. 226 с.
7. Троицкая М.Н., Рамзаев П.В., Моисеев А.А. Радиоэкология ландшафтов Крайнего Севера. Современные проблемы радиобиологии / под общ. ред. чл.-корр. АН СССР А.М. Кузина. М.: Атомиздат, 1971. Т.2: Радиоэкология, глава 13. С. 325-353 с.
8. Рамзаев П.В., Мирецкий Г.И., Троицкая М.Н., Петров А.А. Гигиеническая оценка радиационной обстановки в районах, прилегающих к Новоземельскому полигону. Новая Земля. Природа. История. Археология. Культура [труды МАКЭ]: под общ. ред. П.В. Боярского. М., 1998. Кн. 2., ч. 1: Культурное наследие. Радиоэкология. С. 222-233.
9. Невструева М.А. Об итогах научной деятельности Ленинградского научно-исследовательского института радиационной гигиены за 10 лет (1957-1967 гг.). // Труды по радиационной гигиене: под ред. М.А. Невструевой. Л., 1967. В.3. С. 3-11.
10. Белле Ю.С., Лебедев О.В., Моисеев А.А., и др. Прижизненные измерения радиоактивности человека в ЛНИИРГе в 1961-1966 гг. // Труды по радиационной гигиене: под ред. М.А. Невструевой. Л., 1967. В.3. С. 206-222.
11. Лисаченко Э.П. Комплекс низкофоновых гамма-спектрометров для радиационно-гигиенических исследований (Аппаратура и методики): автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1970. 17 с.
12. Ермолаева-Маковская А.П., Литвер Б.Я. Свинец-210 и полоний-210 в биосфере / под ред. П.В. Рамзаева. М.: Атомиздат, 1978. 160 с.
13. Нижников А.И., Ермолаева-Маковская А.П., Ибатуллин М.С., и др. Свинец-210, полоний-210, радий-226, торий-228 и плутоний-239 в цепочке лишайник-олень-человек на Крайнем Севере СССР. М.: Атомиздат, 1973. С. 3-9.
14. Литвер Б.Я., Рамзаев П.В., Моисеев А.А., и др. Свинец-210 и полоний-210 в приарктических районах восточного Севера. М.: Атомиздат, 1969. С. 3-12.
15. Литвер Б.Я., Моисеев А.А., Рамзаев П.В. Стронций-90 и полоний-210 в костях жителей Крайнего Севера в 1965 г. М.: Атомиздат, 1967. С. 3-8.
16. Литвер Б.Я. Свинец-210, полоний-210, торий-228 в биосфере Крайнего Севера СССР. М.: Атомиздат, 1976. 12 с.
17. Шубик В.М. Ядерные взрывы на Новой Земле (Радиационная иммунология Крайнего Севера). СПб, 1998. 137 с.
18. Рамзаев П.В. Гигиеническое исследование радиационной обстановки на Крайнем Севере СССР, обусловленной глобальными выпадениями: на соиск. учен. степ. д-ра мед. наук. Л., 1967. 397 с.
19. Троицкая М.Н. Гигиеническая оценка повышенных уровней облучения населения Крайнего Севера: автореф. дис... на соиск. учен. степ. д-ра мед. наук. Л., 1982. 39 с.
20. Дударев А.А. Основные закономерности и меры профилактики вредного воздействия стойких токсических веществ на здоровье коренных жителей Российского Севера: автореф. дис... на соиск. учен. степ. д-ра мед. наук. СПб, 2006. 42 с.
21. Литвер Б.Я. Миграция свинца-210 и полония-210 в цепочке лишайник-северный олень-человек: автореф. дис... на соиск. учен. степ. д-ра мед. наук. М, 1972. 28 с.
22. Ермолаева-Маковская А.П. Миграция свинца-210 и полония-210 из внешней среды в организм человека и вопросы нормирования: автореф. дис... на соиск. учен. степ. канд. мед. наук. Л., 1969. 14 с.
23. Попов А.О. Эколого-гигиеническая оценка радиационной обстановки на Крайнем Севере России (на примере Мурманской области и Чукотки): автореф. дис... на соиск. учен. степ. канд. мед. наук. СПб, 2001. 18 с.
24. Колотвин В.А. Влияние инкорпорированного цезия-137 на иммунологические реакции: автореф. дис... на соиск. учен. степ. канд. мед. наук. Л., 1971. 17 с.
25. Невструева М.А., Моисеев А.А., Попов Д.К., Рамзаев П.В. Характеристика радиационного загрязнения биологической цепочки мох-олень-человек на Крайнем Севере СССР в 1961-1964 гг. // Документ НКДАР ООН А/АС.82/Г/Л-1027. М.: Атомиздат, 1964. 5 с.
26. Рамзаев П.В., Троицкая М.Н., Ибатуллин М.С. Статистические параметры обмена цезия-137 в организме человека // Документ НКДАР ООН А/АС.82/Г/Л-11183.- М.: Атомиздат, 1964. 5 с.
27. Прокофьев О.Н. Результаты исследований радиационно-гигиенической обстановки в РСФСР после стратосферных выпадений стронция-90 и цезия-137 в период с 1963 по 1978 гг. // Доклад НКРЗ 81-31.- М.: Атомиздат, 1982. 13 с.
28. Троицкая М.Н., Нижников А.И., Рамзаев П.В., и др. Цезий-137 и стронций -90 в биосфере Крайнего севера СССР. М.: Атомиздат, 1981. 24 с.
29. Рамзаев П.В., Моисеев А.А., Троицкая М.Н. Основные итоги радиационно-гигиенических исследований миграции глобальных выпадений в приарктических районах СССР в 1959-1966 гг. М.: Атомиздат, 1967. 13 с.
30. Рамзаев П.В., Троицкая М.Н., Ибатуллин М.С., Колесников В.В. Статистические параметры обмена цезия-137 глобального происхождения у жителей арктических регионов. М.: Атомиздат, 1967. 19 с.
31. Рамзаев П.В. Вокруг заполярного полигона // Ядерные взрывы в СССР. М., 1992. В.1. С. 137-144.
32. Рамзаев П.В. Северный полигон: радиоэкологические последствия на прилегающих территориях // Ядерные взрывы в СССР. СПб, 1993. В.2. С. 264-269.
33. Рамзаев П.В., Невструева М.А., Ильин Л.А., и др. Результаты исследований глобальных выпадений на территории РСФСР // Атомная энергия. 1969. Т. 26, В.1. С 62- 64.
34. Нижников А.И., Невструева М.А., Рамзаев П.В., Моисеев А.А. Цезий-137 в цепочке лишайник-олень-человек на Крайнем Севере СССР (1962-1968 гг.). М.: Атомиздат, 1969. 15 с.
35. Моисеев А.А. Уровни содержания глобального цезия-137 в организме людей различных групп коренно-

- го населения Ненецкого национального округа в 1965 г. Гос. ком. по использованию атомной энергии СССР. М.: Атомиздат, 1967. 10 с.
36. Моисеев А.А. Прогноз уровней облучения коренных жителей Крайнего Севера за счет инкорпорированного глобального цезия-137. Гос. ком. по использованию атомной энергии СССР. М.: Атомиздат, 1967. 9 с.
  37. Рамзаев П.В., Троицкая М.Н., Ибатуллин М.С., и др. Радиоэкологические параметры цепочки «лишайник-северный олень-человек» // Гигиена и санитария. 1970. № 6. С. 38-42.
  38. Троицкая М.Н., Ермолаева А.П., Теплых Л.А., Рамзаев П.В. Источники и уровни облучения жителей крайнего севера // Гигиена и санитария. 1985. № 12. С. 30-32.
  39. Рамзаев П.В., Троицкая М.Н., Ибатуллин М.С. Метаболизм Cs-137 у человека // Медицинская радиология. 1969. № 8. С. 38-42.
  40. Рамзаев П.В., Троицкая М.Н., Ибатуллин М.С., и др. Особенности радиационно-гигиенической обстановки в районах Крайнего Севера (1959-1965 гг.) // Труды по радиационной гигиене: под ред. М.А. Невструевой. Л., 1967. В. 3. С. 251-261.
  41. Троицкая М.Н., Ермолаева А.П., Ибатуллин М.С., и др. Гигиеническая оценка радиоактивности внешней среды на Крайнем Севере // Радиационная гигиена: сб. научн. тр.; под ред. проф. П.В. Рамзаева. Л., 1975. В.5. С. 108-114.
  42. Троицкая М.Н., Ермолаева А.П., Мирецкий Г.И., и др. Радиационный фактор Крайнего Севера и вопросы здоровья населения // Радиационная гигиена: сб. научн. тр.; под ред. проф. П.В. Рамзаева. Л., 1981. С. 57-62.
  43. Данецкая Е.В., Рамзаев П.В., Ибатуллин М.С., Шакалова В.В. Профилактика последствий внутреннего облучения цезием-137 и стронцием-90 // Радиационная гигиена: сб. научн. тр.; под ред. проф. П.В. Рамзаева. Л., 1975. В.5. С. 197-202.
  44. Шубик В.М., Литвер Б.Я., Троицкая М.Н., и др. Характеристика иммунологических показателей у оленеводов при хроническом облучении инкорпорированными естественными и искусственными радионуклидами // Радиационная гигиена: сб. научн. тр.; под ред. проф. П.В. Рамзаева. Л., 1978. В.7. С. 111-115.
  45. Шубик В.М., Бронштейн И.Э., Королева Т.М., и др. Некоторые показатели здоровья коренных жителей Ханты-Мансийского автономного округа // Радиационная гигиена: сб. научн. тр. СПб, 2004. С. 187-191.
  46. Дикая Е.Я., Немцова М.А., Косырева Н.И., и др. Стронций-90 и цезий-137 во внешней среде и продуктах питания в 1960-1966 гг. // Труды по радиационной гигиене: под ред. М.А. Невструевой. Л., 1967. В.3. С. 261-270.
  47. Троицкая М.Н., Ермолаева-Маковская А.П., Ибатуллин М.С., и др. Искусственная и естественная радиоактивность цепочки лишайник – северный олень – человек в отдаленный период после ядерных испытаний // Радиационная гигиена: под редакцией проф. П.В. Рамзаева. Л., 1971. В.4: материалы республиканской конф. о радиационной гигиене. С. 101-102.
  48. Невструева М.А., Рамзаев П.В., Моисеев А.А., и др. Радиоактивность биосферы на Крайнем Севере СССР // Радиация и организм: сб. материалов конф. Обнинск, 1967. С. 14-16.
  49. Рамзаев П.В., Троицкая М.Н., Ермолаева А.П., и др. Верхлинейные эффекты малых доз ионизирующего излучения // Задачи гигиенической науки и практики в повышении качества госнадзора по контролю за использованием ядерной энергии в мирных целях: сб. науч. тр. Л., 1978. С. 140-144.
  50. Троицкая М.Н., Дмитриев И.М., Ермолаева-Маковская А.П., и др. О действии малых доз на некоторые биологические показатели оленей и оленеводов // Радиационная гигиена: под редакцией проф. П.В. Рамзаева. Л., 1971. В.4: материалы республиканской конф. о радиационной гигиене. С. 178-180.
  51. Мирецкий Г.И., Рамзаев П.В., Чугунов В.В., Шувалов И.Е. Законодательное обеспечение медико-экологического благополучия населения Арктики // Ноология. Экология. Здоровье. Гуманизм: материалы 2-й междунар. науч. конф., 21-24 января 1998. СПб, 1998. С. 11-113.
  52. Троицкая М.Н., Ермолаева А.П., Нижников А.И., Теплых Л.А. Дозы облучения населения Крайнего Севера. М.: ЦНИИ атоминформ, 1986. 11 с.
  53. Омельчук В.В. Профессор П.В. Рамзаев – ученый с мировым именем // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 5-8.
  54. Омельчук В.В., Архангельская Г.В., Звонова И.А. Международные аспекты деятельности профессора П.В. Рамзаева // Актуальные вопросы радиационной гигиены: сб. тез. конф. СПб, 2014. С.153-154.
  55. Онищенко Г.Г., Звонова И.А., Балонов М.И., и др. Научное наследие профессора Павла Васильевича Рамзаева // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (спецвып.). С. 9-19.
  56. AMAP, 1998. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Chapter 8 Radioactivity, Oslo, Norway. P. 526-620.
  57. AMAP Assessment 2002: Radioactivity in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2004. 111 p.
  58. Travnikova I.G., Shutov V.N., Bruk G.Ya., et al. Assessment of current exposure levels in different population groups of the Kola Peninsula // Journal of Environmental Radioactivity. 2002. Vol. 60. P. 235-248.
  59. Golikov V., Logacheva I., Bruk G., et al. Modelling of long-term behaviour of caesium and strontium radionuclides in the Arctic environment and human exposure // Journal of Environmental Radioactivity. 2004. Vol. 74. P. 159-169.
  60. Strand P., Howard B.J., Aarkrog A., et al. Radioactive contamination in the ArcticFsources, dose assessment and potential risks // Journal of Environmental Radioactivity. 2002. Vol. 60. P. 5-21.

Поступила: 17.04.2020 г.

**Омельчук Василий Владимирович** – доктор медицинских наук, доцент, ученый секретарь Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: vasily.omelchuk@yandex.ru

**Для цитирования: Омельчук В.В. Радиационно-гигиеническая характеристика глобальных выпадений радионуклидов в арктических регионах России (по данным НИИ радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева) // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 51-66. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-51-66**

## Radiation-hygienic characteristic of the global radionuclide fallout in the arctic regions of Russia (based on the data of the Institute of Radiation Hygiene after professor P.V. Ramzaev)

Vasiliy V. Omelchuk <sup>1,2</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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

*The recent years are associated with active development of the coastal areas of the Russian arctic regions including a construction of the facilities of the extraction and processing of the hydrocarbons, the civil and military facilities. The nuclear weapon tests, performed by the USSR and other nuclear countries in the second half of the XX century, lead to the global radioactive fallout, including the fallout on coastal areas of the arctic regions of the USSR. Five most powerful nuclear munitions were tested on the Novaya Zemlya Test Site in the Arkhangelsk region. The Institute of Radiation Hygiene after professor P.V. Ramzaev (before 1994 – the Leningrad Scientific-Research Institute of Radiation Hygiene) has accumulated a 20-year experience of the radiation-hygienic surveys on the assessment of the consequences of the nuclear weapon tests for the Far-North of the USSR: from the development of the equipment and methods for the extraction, analysis and measurement of the low levels of the radioactive isotopes in humans and environment, to the wide-scale radiation-hygienic surveys of the links in the “northern food chain” – lichen, reindeers and native inhabitants. The obtained data allowed performing a complex assessment of the role of the radiation factor in the health of the public residing on the coastal areas of the Arctic Ocean.*

**Key words:** global radioactive fallout, man-made radionuclides, “food chain” lichen-reindeer-human, activity concentration, doses to the public

### References

- Nuclear explosions in the USSR. Northern test-site: reference information. Ed. by acad. Mikhailov VN. 2<sup>nd</sup> ed. Saint-Petersburg, NPO Radium Institute after V.G. Khlopin; 1993. 163 p. (In Russian).
- Radiation-hygienic aspects of the consequences of the Chernobyl NPP accident. Ed. by Academ. of the RAS Onischenko G.G. and prof. Popova A.Yu. Saint-Petersburg: NIIRG after P.V. Ramzaev; 2016. Vol. 1. 448 p. (In Russian)
- Romanovich IK, Balonov MI, Barkovsky AN, Nikitin AI, et al. Accident on the “Fukushima-1” NPP: development of the prophylactic measures aimed at the preservation of the health of the public of the Russian Federation. Ed. by Academ. of the RAMN Onischenko G.G. Saint-Petersburg: NIIRG after P.V. Ramzaev; 2012. 336 p. (In Russian)
- Moiseev AA, Ramzaev PV. <sup>137</sup>Cs in biosphere. Moscow: Atomizdat; 1975. 184 p. (In Russian)
- Miretskiy GI, Ramzaev PV, Zakharchenko MP, Luchkevich VS. Radiation factor on the Far North of Russia. Saint-Petersburg; 1999. 204 p. (In Russian)
- Shubik VM, Migunov VI, Stamat IP. Health of the native inhabitants of the Far North (radiation-hygienic aspects). Saint-Petersburg: NIIRG after P.V. Ramzaev; 2004. 226 p. (In Russian)
- Troitskaya MN, Ramzaev PV, Moiseev AA. Radioecology of the landscapes of the Far North. Modern issues of radiobiology. Ed. by corr. Member of AN USSR Kuzin AM. Atomizdat; 1971. Vol. 2 (Radioecology, ch. 13). P. 325-353 (In Russian)
- Ramzaev PV, Miretskiy GI, Troitskaya MN, Petrov AA. Hygienic assessment of the radiation situation in the regions neighboring to Novozemelskiy test-site. Novaya Zemlya. Nature. History. Archeology. Culture [Annals of MAKE]. Ed. by Boyarsky PV. Moscow; 1998. book 2 (part 1 (Cultural legacy, Radioecology)). P. 222-233 (In Russian).
- Nevstrueva MA. On the results of the scientific activities of the Leningrad scientific-research institute of radiation hygiene in 10 years (1957-1967). Annals on radiation hygiene: ed. by Nevstrueva M.A. Leningrad; 1967. Issue 3. P. 3-11 (In Russian).
- Belle YuS, Lebedev OV, Moiseev AA, Romanov LR, Spirin VD, Shchamov VP, et al. Intravital measurements of the human radioactivity in LNIIRG in 1961-1966. Annals on radiation hygiene: ed. by Nevstrueva M.A. Leningrad; 1967. Issue 3. P. 206-222 (In Russian).
- Lisachenko EP. Complex of the low-background gamma-spectrometers for the radiation-hygienic studies (equipment and methods). Abstract of PhD thesis. Moscow; 1970. 17 p. (In Russian).
- Ermolaeva-Makovskaya AP, Litver BYa. 210-Lead and 210-Polonium in the biosphere. Ed. by Ramzaev P.V. Moscow: Atomizdat; 1978. 160 p. (In Russian).
- Nizhnikov AI, Ermolaeva-Makovskaya AP, Ibatullin MS, Lisachenko EP, Ramzaev PV, et al. 210-Lead, 210-Polonium, 225-Radium, 228-Thorium and 239-Plutonium in the chain lichen-deer-human of the Far North of the USSR. Moscow: Atomizdat; 1973. P. 3-9 (In Russian).
- Litver BYa, Ramzaev PV, Moiseev AA, Troitskaya MN, Krisyuk EM, Lisachenko EP, et al. 210-Lead and 210-Polonium in the subarctic regions of the eastern North. Moscow: Atomizdat; 1969. P. 3-12 (In Russian).
- Litver BYa, Moiseev AA, Ramzaev PV. 90-Strontium and 210-Polonium in the bones of the residents of Far North in 1965. Moscow: Atomizdat; 1967. P. 3-8 (In Russian).
- Litver BYa. <sup>210</sup>Pb, <sup>210</sup>Po, <sup>228</sup>Th in the biosphere of the Far North of the USSR. Moscow: Atomizdat; 1976. 12 p. (In Russian).
- Shubik VM. Nuclear explosions on the Novaya Zemlya (radiation immunology of the Far North). Saint-Petersburg; 1998. 137 p. (In Russian).

**Vasiliy V. Omelchuk**

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

**Address for correspondence:** Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vasiliy.omelchuk@yandex.ru

18. Ramzaev PV. Hygienic survey of the radiation situation on the Far North of the USSR due to the global fallouts: abstract of doctoral thesis. Leningrad; 1967. 397 p. (In Russian).
19. Troitskaya MN. Hygienic assessment of the increased levels of exposure of the residents of the Far North: abstract of doctoral thesis. Leningrad; 1982. 39 p. (In Russian).
20. Dudarev AA. Major trends and measures of prophylactics of hazardous exposure of the stable toxic substances on the health of the native inhabitants of the Russian North: abstract of doctoral thesis. Saint-Petersburg; 2006. 42 p. (In Russian).
21. Litver BYa. Migration of the 210-Lead and 210-Polonium in the chain lichen-northern deer-human: abstract of doctoral thesis. Moscow; 1972. 28 p. (In Russian).
22. Ermolaeva-Makovskaya AP. Migration of 210-Lead and 210-Polonium from the environment to the human body and the issues of regulation: abstract of doctoral thesis. Leningrad; 1969. 14 p. (In Russian).
23. Popov AO. Ecological-hygienic assessment of the radiation situation on the Far North of Russia (on the example of Murmansk region and Chukotka). Abstract of PhD thesis. Saint-Petersburg; 2001. 18 p. (In Russian).
24. Kolotvin VA. Impact of the incorporated caesium-137 on the immunologic reactions. Abstract of PhD thesis. Leningrad; 1971. 17 p. (In Russian).
25. Nevstrueva MA, Moiseev AA, Popov DK, Ramzaev PV. Characteristics of the radioactive contamination of the biological chain moss-deer-human on the Far North of the USSR in 1961-1964. Report of the UNSCEAR A/AC.82/G/L-1027. Moscow: Atomizdat; 1964. 5 p. (In Russian).
26. Ramzaev PV, Troitskaya MN, Ibatullin MS. Statistical parameters of the caesium-137 metabolism in the human body. Report of the UNSCEAR A/AC.82/G/L-11183. Moscow: Atomizdat; 1964. 5 p. (In Russian).
27. Prokofyev ON. Results of the surveys of the radiation-hygienic situation in RSFSR after the stratosphere fallouts of strontium-90 and caesium-137 in 1963-1978. ICRP report 81-31. Moscow: Atomizdat; 1982. 13 p. (In Russian).
28. Troitskaya MN, Nizhnikov AI, Ramzaev PV, Dikaya EYa, Ermolaeva AP, Litver BYa. Caesium-137 and strontium-90 in the biosphere of the Far North of the USSR. Moscow: Atomizdat; 1981. 24 p. (In Russian).
29. Ramzaev PV, Moiseev AA, Troitskaya M.N. Main results of the radiation-hygienic surveys of the migration of the global fallouts in the subarctic regions of the USSR in 1959-1966. Moscow: Atomizdat; 1967. 13 p. (In Russian).
30. Ramzaev PV, Troitskaya MN, Ibatullin MS, Kolesnikov VV. Statistical parameters of the metabolism of caesium-137 from the global fallouts for the residents of arctic regions. Moscow: Atomizdat; 1967. 19 p. (In Russian).
31. Ramzaev PV. Around the transpolar test-site. *Yadernye vzryvy v SSSR = Nuclear explosions in the USSR*. Moscow; 1992;1: 137-144 (In Russian)
32. Ramzaev PV. Northern test-site: radioecological consequences on the neighboring territories. *Yadernye vzryvy v SSSR = Nuclear explosions in the USSR*. Saint-Petersburg; 1993;2: 264-269 (In Russian)
33. Ramzaev PV, Nevstrueva MA, Ilyin LA, Prokofyev ON, Popov DK, Shvydko NS, et al. Results of the surveys on the global fallouts on the territory of the RSFSR. *Atomnaya energiya = Atomic energy*. 1969;26(1): 62-64 (In Russian)
34. Nizhnikov AI, Nevstrueva MA, Ramzaev PV, Moiseev AA. Caesium-137 in the chain lichen-deer-human on the Far North of the USSR (1962-1968). Moscow: Atomizdat; 1969. 15 p. (In Russian)
35. Moiseev AA. Levels of concentration of the global caesium-137 in the representatives of different groups the native inhabitants of the Nenetsk national district in 1965. State committee on the use of the atomic energy of the USSR. Moscow: Atomizdat; 1967. 10 p. (In Russian)
36. Moiseev AA. Prognosis of the levels of exposure of the native inhabitants of the Far North from the incorporated global Caesium-137. State committee on the use of the atomic energy of the USSR. Moscow: Atomizdat; 1967. 9 p. (In Russian)
37. Ramzaev PV, Troitskaya MN, Ibatullin MS, Moiseev AA, Nizhnikov AI, Dmitriev IM. Radioecological parameters of the chain «lichen-northern deer-human». *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 1970;6: 38-42. (In Russian)
38. Troitskaya MN, Ermolaeva AP, Teplykh LA, Ramzaev PV. Sources and levels of exposure of the residents of the Far North. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 1985;12: 30-32 (In Russian)
39. Ramzaev PV, Troitskaya MN, Ibatullin MS. Metabolism of Cs-137 in humans. *Meditsinskaya radiologiya = Medical radiology*. 1969;8: 38-42 (In Russian)
40. Ramzaev PV, Troitskaya MN, Ibatullin MS, Moiseev AA, Nizhnikov AI, Kolesnikov VV, et al. Features of the radiation-hygienic situation in the regions of Far North. *Annals of the radiation hygiene*: ed. by Nevstrueva M.A. Leningrad; 1967;3: 251-261 (In Russian)
41. Troitskaya MN, Ermolaeva AP, Ibatullin MS, Litver BYa, Nizhnikov AI, Ramzaev PV, et al. Hygienic assessment of the environmental radioactivity on the Far North. *Radiation Hygiene*: ed. by prof. Ramzaev P.V. Leningrad; 1975. Issue 5. P. 108-114 (In Russian)
42. Troitskaya MN, Ermolaeva AP, Miretskiy GI, Nizhnikov AI, Teplykh LA, Shubik VM. Radiation factor of the Far North and issues of public health. *Radiation Hygiene*: ed. by prof. Ramzaev P.V. Leningrad; 1981. P. 57-62 (In Russian)
43. Danetskaya EV, Ramzaev PV, Ibatullin MS, Shakalova VV. Prophylactics of the consequences of the internal exposure with caesium-137 and strontium-90. *Radiation Hygiene*: ed. by prof. Ramzaev P.V. Leningrad; 1975. Issue 5. P. 197-202 (In Russian)
44. Shubik VM, Litver BYa, Troitskaya MN, Miretskiy GI, Myagi EG, Pribytok AA, et al. Characteristics of the immunological indicators for the deer-herders due to the chronic exposure by the incorporated natural and artificial radionuclides. *Radiation Hygiene*: ed. by prof. Ramzaev P.V. Leningrad; 1978. Issue 7. P. 111-115 (In Russian)
45. Shubik VM, Bronshteyn IE, Koroleva TM, Nuralov VN, Strelnikova NK, Sukalskaya SYa, et al. Some health indicators of the native inhabitants of the Hanti-Mansiyskiy autonomous district. *Radiation hygiene*. Saint-Petersburg; 2004. P. 187-191 (In Russian)
46. Dikaya EYa, Nemtsova MA, Kosyreva NI, Antonova VA, Ponikarov VI, Drichko VF, et al. Strontium-90 and cesium-137 in the environment and food products in 1960-1966. *Annals of radiation hygiene*: ed. by Nevstrueva M.A. Leningrad; 1967. Issue 3. P. 261-270 (In Russian)
47. Troitskaya MN, Ermolaeva-Makovskaya AP, Ibatullin MS, Litver BYa, Nizhnikov AI, Teplykh LA. Artificial and natural radioactivity of the chain lichen-northern deer-human in the distant period after the nuclear tests. *Radiation hygiene: proceedings of the republican conference on the radiation hygiene*. Ed. by prof. Ramzaev P.V. Leningrad; 1971. P. 101-102 (In Russian)
48. Nevstrueva MA, Ramzaev PV, Moiseev AA, Troitskaya MN, Ibatullin MS, Nizhnikov AI, et al. Radioactivity of the biosphere in the Far North of the USSR. *Radiation and organism: proceedings of the conference*. Obninsk; 1967. P. 14-16 (In Russian)
49. Ramzaev PV, Troitskaya MN, Ermolaeva AP, Ibatullin MS, Moiseev AA, Nizhnikov AI, et al. Superlinear effects of the low doses of ionizing exposure. Objectives of the hygienic science and practice for the improvement of state sanitary surveillance on the control of the use of the atomic energy in peaceful applications. Leningrad; 1978. P. 140-144 (In Russian)

50. Troitskaya MN, Dmitriev IM, Ermolaeva-Makovskaya AP, Nizhnikov AI, Ramzaev PV. On the effects of the low doses on different biological indicators of the deers and deer-herders. Radiation hygiene: proceedings of the republican conference on the radiation hygiene. Ed. by. prof. Ramzaev P.V. 1971. Issue 4. P. 178-180 (In Russian)
51. Miretskiy GI, Ramzaev PV, Chugunov VV, Shuvalov IE. Legislative provision of the medical-ecological well-being of the Arctic population. Noology. Ecology. Humanism: proceeding of the 2nd international scientific conference 21-24.01.1998. Saint-Peterdurg; 1998. P. 11-113 (In Russian)
52. Troitskaya MN, Ermolaeva AP, Nizhnikov AI, Teplykh LA. Doses to the population of the Far North. Moscow: CNII Atominform; 1986. 11 p. (In Russian)
53. Omelchuk VV. Professor P.V. Ramzaev – a globally renowned scientist. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 5-8 (In Russian)
54. Omelchuk VV, Arkhangelskaya GV, Zvonova IA. International aspects of the activities of prof. P.V. Ramzaev. Actual issues of the radiation hygiene: proceedings of the conference. Saint-Petersburg; 2014. P. 153-154 (In Russian)
55. Onischenko GG, Zvonova IA, Balonov MI, Ramzaev VP, Repin VS. Scientific legacy of the professor P.V. Ramzaev. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2 (special issue)): 9-19 (In Russian)
56. 56. AMAP, 1998. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Chapter 8 Radioactivity, Oslo, Norway. P. 526-620.
57. 57. AMAP Assessment 2002: Radioactivity in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo; 2004. 111 p.
58. 58. Travnikova IG, Shutov VN, Bruk GYa, Balonov MI, Skuterud L, Strand P, et al. Assessment of current exposure levels in different population groups of the Kola Peninsula. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;60: 235–248.
59. 59. Golikov V, Logacheva I, Bruk G, Shutov V, Balonov M, Strand P, et al. Modelling of long-term behaviour of caesium and strontium radionuclides in the Arctic environment and human exposure. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;74: 159–169.
60. 60. Strand P, Howard BJ, Aarkrog A, Balonov M, Tsaturov Y, Bewers JM, et al. Radioactive contamination in the ArcticFsources, dose assessment and potential risks. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;60: 5–21.

Received: 17 April, 2020

**For correspondence: Vasiliy V. Omelchuk** – Doctor of Medical Sciences, Docent, Scientific Secretary, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; North-Western State Medical University after I.I. Mechnikov of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation. (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vasily.omelchuk@yandex.ru)

**For citation: Omelchuk V.V. Radiation-hygienic characteristic of the global radionuclide fallout in the arctic regions of Russia (based on the data of the Institute of Radiation Hygiene after professor P.V. Ramzaev). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 4. P. 51-66. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-51-66**

## Ретроспективный анализ радиационной обстановки на территории Орловской области

В.Г. Симонова, Л.И. Бубликова

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Орел, Россия

*В статье рассмотрена радиационная обстановка на территории Орловской области спустя 33 года после аварии на Чернобыльской АЭС. Проведение паспортизации с 1998 г. позволило оценить основные показатели радиационной обстановки в области и провести их сравнительный анализ, дать оценку доз облучения населения от всех основных источников и воздействия радиационного фактора на здоровье населения, определить наиболее значимые направления снижения доз облучения населения. Вклад техногенных источников в коллективную дозу облучения населения Орловской области составил в 2017 г., по данным радиационно-гигиенической паспортизации, 0,73%, что в 3 раз выше, чем по Российской Федерации (0,24%). Это связано, в первую очередь, с радиоактивным загрязнением части территории области после аварии на Чернобыльской АЭС. Орловская область – одна из 14 областей РФ, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Радиоактивному загрязнению вследствие данной катастрофы в той или иной степени подверглись 22 из 24 районов Орловской области (около 40% территории области). Различия в выпадении атмосферных осадков привели к тому, что сформировалось чрезвычайно пятнистое загрязнение территории Орловской области. В ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС принимали участие 1243 человека из Орловской области. 43% их них стали инвалидами 1, 2 и 3 группы, 115 человек (9%) умерли в течение 14 лет после этих событий. В Орловской области радиационная обстановка остаётся стабильной. Радиационный фон находится на уровне от 0,12 до 0,19 мкЗв/ч, что соответствует значениям, характерным для Орловской области до аварии на Чернобыльской АЭС. Результаты мониторинга радиоактивного загрязнения основных продуктов питания местного производства за анализируемый период позволяют говорить об относительной стабилизации содержания основных дозообразующих радиоизотопов Cs-137 и Sr-90. Сопоставление доз облучения за счет дополнительного облучения за 1-й и 33-й годы после аварии показало снижение в 51 раз за счет физического распада долгоживущих радиоизотопов и короткоживущих радионуклидов, а также заглупления их в почву.*

**Ключевые слова:** радиационная обстановка, Орловская область, авария на ЧАЭС, Cs-137, эффективные дозы облучения населения.

Присутствие большого количества техногенных радиоактивных веществ в биосфере – следствие развития атомной индустрии [1]. Прошлые радиационные аварии и глобальные выпадения формируют дозы техногенного облучения населения [2].

По данным МЧС, в результате катастрофы на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) в 1986 г. радиоактивному загрязнению подверглись 14 субъектов Российской Федерации, общей площадью 60 тыс. км<sup>2</sup>, на территории которых проживали более 3 млн человек. Вследствие аварии на ЧАЭС радиоактивному загрязнению подверглись около 1 млн га земель лесного фонда и более 2 млн га сельскохозяйственных угодий Российской Федерации [3].

Наибольшее загрязнение получили следующие территории: Брянская (загрязнено 12,1 тыс. км<sup>2</sup> территории), Тульская (11,6 тыс. км<sup>2</sup>), Калужская (4,9 тыс. км<sup>2</sup>) и Орловская (8,9 тыс. км<sup>2</sup>) области [4].

Орловская область, которая не отягощена в радиационном плане ни предприятиями по переработке радиоактивных материалов, ни месторождениями руд, добываемых с целью извлечения из них природных радионуклидов, ни нефтяными промыслами, представляет интерес, так как на ее территории проживает более 130 тыс. человек, пострадавших в результате последствий аварии на ЧАЭС. Радиоактивному загрязнению вследствие катастрофы на ЧАЭС подверглись 22 из 24 районов Орловской области (около 40% территории области): Болховский, Дмитровский, Мценский, Верховский, Глазуновский, Залегощенский, Знаменский, Колпнянский, Кромской, Краснотуровский, Троснянский, Малоархангельский, Новосильский, Новодеревеньковский, Орловский, Покровский, Свердловский, Сосковский, Урицкий, Шаблыкинский, Хотынецкий, Должанский. В зонах радиоактивного загрязнения на 1992 г. проживало 355 тыс.

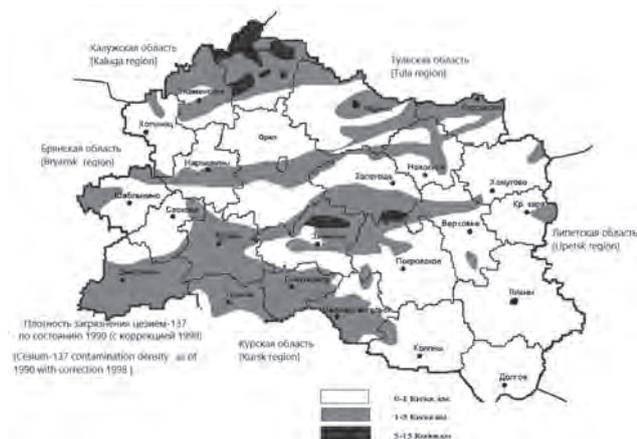
**Симонова Виктория Геннадьевна**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Адрес для переписки: 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95; E-mail: segeja36@mail.ru

граждан, в том числе 67,5 тыс. детей (более 35% населения Орловской области).

Различия в выпадении атмосферных осадков привели к тому, что сформировалось чрезвычайно пятнистое загрязнение территории Орловской области (рис. 1) [5].



**Рис. 1.** Карта-схема радиоактивного загрязнения территории Орловской области Cs-137  
**[Fig. 1.** Map-scheme of radioactive contamination of the territory of the Oryol region with Cs-137]

На территории области в первые сутки после аварии не наблюдалось осадков в виде дождя. При анализе данных метеостанций Орловской области о суточном количестве осадков за апрель 1986 г. было установлено, что максимальная сумма осадков в период с 28 по 30 апреля 1986 г. выпала на территории города Болхов и города Орел [6].

Резкое увеличение радиационного фона на территории Орловской области в апреле 1986 г. было обусловлено выпадением аварийного выброса с ЧАЭС.

В таблице 1 показана динамика изменения мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения во всех

районах Орловской области и г. Орел в 1986–1987 гг. В таблице 1 выделены районы со значительным повышением радиационного фона.

При этом следует отметить, что в 1986–1987 гг. измерения радиационного фона на территории области проводились, в основном, геологоразведочными поисковыми радиометрами СРП-68-01, отградуированными по естественному радиоактивному элементу Ra-226.

Известно, что данный тип прибора завышает показания мощности экспозиционной дозы в области малых энергий гамма-излучения. При этом мощность экспозиционной дозы, измеренная дозиметром, показания которого не зависят от энергии, может отличаться от показаний прибора СРП-68-01 при различных условиях измерения от 1,5 до 3,5 раз.

В связи с этим в первом квартале 1990 г. специалистами Ленинградского научно-исследовательского института радиационной гигиены МЗ РСФСР были уточнены дозовые нагрузки на население за счет аварии на ЧАЭС, которые составили за 1989 г. 0,9–1,5 мЗв в дополнение к естественному фону, что ниже регламентированного норматива 5 мЗв в год [7].

По истечении 5-летнего периода после аварии на ЧАЭС уровни МЭД гамма-излучения на территории Орловской области составляли: в Болховском районе от 12 до 60–65 мкР/ч (плотность загрязнения до 6,5 Ки/км<sup>2</sup>); в Дмитровском районе от 10 до 35 мкР/ч (плотность загрязнения до 3 Ки/км<sup>2</sup>). Средние уровни МЭД гамма-излучения в остальных районах составляли от 8 до 30 мкР/ч.

Постановлением Правительства Российской Федерации № 1582 от 19.12.1997 г. были пересмотрены границы зон радиоактивного загрязнения в Орловской области. К зоне радиоактивного загрязнения отнесен 901 населенный пункт, в том числе 15 населенных пунктов – к зоне проживания с правом на отселение. Численность населения, проживающего в зонах радиоактивного загрязнения, составила 138 тыс. человек, в том числе 24 тыс. детей [8].

Таблица 1

**Характеристика радиационной обстановки в Орловской области в доаварийный и послеаварийный периоды**

[Table 1

**Characteristics of the radiation situation in the Oryol region in the pre-accident and post-accident periods]**

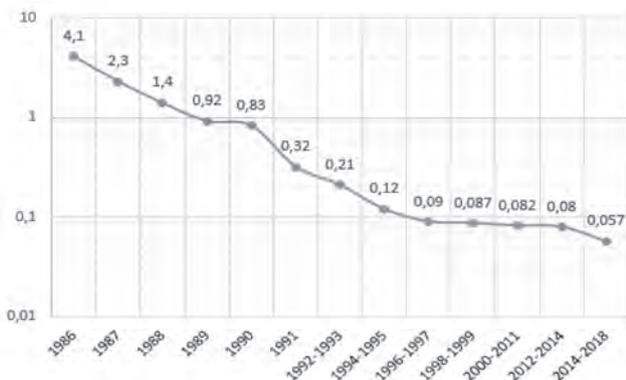
Район [Area]	Численность населения (тыс. чел.) [Number population (thousand people)]	МЭД (мкР/ч) [MED (μR/h)]						
		До 26.04.1986 г. [Before 04/26/1986 year]	28.04–02.05. 1986 г. [04/28. – 05/02. 1986 year]	10–13.05. 1986 г. [05/10-05/13/ 1986 year]	Июль – август 1986 г. [July - August 1986 year]	Сентябрь – ноябрь 1986 г. [September - November 1986 year]	Зима 1986–1987 гг. над снегом [Winter 1986- 1987 over the snow]	Апрель – май 1987 г., после таяния снегов [April-May 1987, after snowmelt]
г. Орел [Oryol]	350	10–12	800	150–200	40–60	40–35	20–25	30
Болховский [Bolkhovsky]	22,8	–«–	1200	600–700	250–300	270–280	70–100	80–120
Дмитровский [Dmitrovsky]	18,3	–«–	1000–1300	550–600	250–300	160–180	60–90	90–110

Район [Area]	Численность населения (тыс. чел.) [Number population (thousand people)]	МЭД (мкР/ч) [MED (μR/h)]						
		До 26.04.1986 г. [Before 04/26/1986 year]	28.04–02.05. 1986 г. [04/28. – 05/02. 1986 year]	10–13.05. 1986 г. [05/10-05/13/ 1986 year]	Июль – август 1986 г. [July -August 1986 year]	Сентябрь – ноябрь 1986 г. [September- November 1986 year]	Зима 1986–1987 г. над снегом [Winter 1986- 1987 over the snow]	Апрель – май 1987 г., после таяния снегов [April-May 1987, after snowmelt]
Мценский [Mtsensky]	68,0	–«–	200–250	100–150	40–60	30–40	20–30	30–35
Верховский [Verkhovsky]	24,0	–«–	80–90	40–60	25–35	30–35	28–30	20–25
Глазуновский [Glazunovsky]	15,9	–«–	50–60	30–35	20–25	20–25	17–20	20–25
Должанский [Dolzhansky]	14,6	–«–	30–35	20–25	20–25	17–20	15–17	17–20
Краснозорецкий [Krasnozorensky]	8,3	–«–	35–40	25–30	20–25	18–20	18–20	18–20
Троснянский [Trosnyansky]	14,6	–«–	280–250	70–90	60–70	40–45	35–40	25–30
Ливенский [Livensky]	82,1	–«–	45–50	25–30	12–17	15–17	12–15	12–17
Малорхангельский [Malorkhangelsky]	15,3	–«–	250–260	100–130	40–60	45–50	30–35	19–25
Новосильский [Novosilsky]	16,3	–«–	45–50	35–40	17–20	15–17	10–15	10–15
Новодеревеньковский [Novoderevenkovsky]	14,1	–«–	30–35	25–30	17–20	17–20	12–17	12–15
Орловский [Orlovsky]	60,4	–«–	400–800	120–350	40–90	25–40	25–40	20–35
Покровский [Pokrovsky]	19,1	–«–	240–250	70–90	60–70	60–65	55–60	40–50
Свердловский [Sverdlovsky]	18,4	–«–	70–80	45–50	40–45	25–30	20–25	17–20
Сосковский [Soskovsky]	8,5	–«–	40–50	30–35	20–25	20–25	17–20	12–17
Урицкий [Uritsky]	18,1	–«–	220–280	150–160	40–60	40–50	30–35	17–25
Шаблыкинский [Shablykinsky]	10,0	–«–	80–100	60–70	30–45	30–35	25–30	15–20
Хотынецкий [Khotynetsky]	11,9	–«–	55–70	35–40	20–25	20–25	15–20	12–17
Залегощенский [Zalegoschensky]	17,8	–«–	140–150	70–80	35–50	32–39	20–25	18–25
Знаменский [Znamensky]	6,2	–«–	200–250	100–130	60–90	40–60	30–40	25–30
Колпнянский [Kolpnyansky]	21,4	–«–	28–35	25–30	18–20	18–20	17–19	15–20
Кромской [Kromskoy]	22,5	–«–	200–240	100–120	50–60	40–45	20–40	20–25

В период с 1986 по 2018 г. индивидуальные эффективные дозы облучения за счет техногенно-измененного фона снизились почти в 51 раз (рис. 2).

Для оценки ситуации, сложившейся за 33-летний период после аварии на ЧАЭС, были использованы данные официальных информационных сборников по средним годовым эффективным дозам облучения в 2011 [9] и 2014 гг. [10].

Средняя индивидуальная годовая эффективная доза, мЗв/год  
[Average individual annual effective dose, mSv/year]



**Рис. 2.** Динамика изменения индивидуальной годовой эффективной дозы облучения населения Орловской области за счет техногенно-измененного фона вследствие аварии на ЧАЭС в период с 1986 по 2018 г.

[Fig. 2. Changes in the individual annual effective radiation doses to the population of the Oryol Region due to the technologically altered background after the Chernobyl NPP accident from 1986 to 2018]

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 8 октября 2015 № 1074<sup>1</sup>, на территории Орловской области к зонам радиоактивного загрязнения отнесено 814 населённых пунктов. Из них 1 населённый пункт находится в зоне проживания с правом на отселение (плотность загрязнения 5–15 Ки/км<sup>2</sup>), в котором по последней переписи населения проживают 4 человека, и 813 населённых пункта – в зоне проживания с льготным социально-экономическим статусом (плотность загрязнения 1–5 Ки/км<sup>2</sup>), в которых проживает 137 670 человек.

Все 20 районов (Орловский, Свердловский, Сосковский, Кромской, Малоархангельский, Мценский, Новодеревеньковский, Новосильский, Троснянский, Урицкий, Хотынецкий, Шаблыкинский, Залегощенский, Знаменский, Колпнянский, Корсаковский, Болховский, Верховский, Глазуновский, Дмитровский) являются сельскохозяйственными.

В результате проведения комплекса реабилитационных и защитных мероприятий, а также процессов распада радиоактивных веществ на территории Орловской области произошло значительное снижение содержания Cs-137 в продукции сельского хозяйства местного производства.

Значения суммарных доз облучения населения в населенных пунктах Орловской области соответствуют требованиям Закона «О радиационной безопасности населения»<sup>2</sup> [11].

На территории Орловской области радиационных аномалий не выявлено.

Проводились исследования воды открытых водоемов 2-й категории, проб питьевой воды из централизованных и нецентрализованных источников водоснабжения на суммарную альфа- и бета-активность. Превышений контрольных уровней, установленных в НРБ-99/2009, не выявлено (табл. 2).

Результаты мониторинга радиоактивного загрязнения основных продуктов питания местного производства показывают незначительную вариабельность концентрации радионуклидов (от 1 до 10 Бк/кг) как по максимальным, так и по средним показателям. В то же время эти концентрации значительно ниже регламентированных нормативов (по молоку: Cs-137 – 100 Бк/кг (л); Sr-90 – 25 Бк/кг (л)).

Такие уровни загрязнения продуктов питания местного производства сохраняются уже на протяжении 5 лет.

В заключение можно констатировать, что состояние природной среды и радиационная обстановка на загрязненных радионуклидами территориях Орловской области остаются стабильными. Ни в одном из районов области радиационный фактор не является ведущим фактором вредного воздействия на здоровье населения.

Таблица 2

#### Исследования проб воды на суммарную альфа- и бета-активность

[Table 2

#### Studies of water samples for total alpha and beta activity]

Объект исследований [Object of research]	Количество проб [Number of samples]			
	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Вода открытых водоемов 2-й категории [Water of open reservoirs of the 2nd category]	188	161	141	171
Питьевая вода из централизованных источников водоснабжения [Drinking water from centralized water sources]	682	627	484	516
Питьевая вода из нецентрализованных источников водоснабжения [Drinking water from non-centralized water supply sources]	48	55	10	33

<sup>1</sup> Российская Федерация. Постановление Правительства. «Об утверждении перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС», от 08.10.2015, № 1074 [Russian Federation. Decree of the Government on the establishment of the list of residual places in the boundaries of the zones of radiative contamination due to the Chernobyl NPP accident, #1074, 08.10.2015 (In Russ.)]

<sup>2</sup> Федеральный закон №3-ФЗ от 09.01.1996. «О радиационной безопасности населения» (с изменениями от 22 августа 2004 г., 23 июля 2008 г., 18 июля 2011 г., 19 июля 2011 г.). [Federal State Law No 3-FZ from 09.01.1996 “On the radiation safety of the public” (In Russ.)]

Важнейшей задачей преодоления оставшихся проблем является комплексная радиационная и социально-экономическая реабилитация загрязненных территорий, включающая принятие конкретных мер по экономическому возрождению и устойчивому развитию загрязненных территорий; продолжение работы по снижению социально-психологической напряженности населения, улучшению информирования о накопленных дозах, полученных с момента аварии на ЧАЭС, о влиянии радиации на здоровье, обеспечение проведения радиационного мониторинга и оценки доз облучения населения на территориях населенных пунктов Орловской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС; совершенствование оказания медицинской помощи населению современными и доступными средствами [12].

*Катастрофа, произошедшая в Чернобыле весной 1986 г., повлияла на историю человечества в целом и перевернула сознание людей. На территории ЧАЭС запечатлена картина масштабнейшей экологической катастрофы, ее последствия еще на протяжении многих десятилетий будут оставлять свой отпечаток [13].*

### Литература

1. Корсаков А.В., Яблоков А.В., Трошин В.П., и др. Динамика частоты врожденных пороков развития у детского населения Брянской области, проживающего в условиях радиационного загрязнения (1991-2012) // *Здравоохранение РФ*. 2014. Т. 6. С. 49-53.
2. Полякова Е.В., Симонова В.Г. Гигиеническая оценка дозовых нагрузок на население Орловской области от социально-значимых источников ионизирующего излучения. Сборник докладов и тезисов научно-практической конференции «Роль, проблемы и задачи радиационно-гигиенической паспортизации в обеспечении радиационной безопасности населения». СПб., 2005. С. 60-62.
3. Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. Последствия облучения для здоровья человека в результате Чернобыльской аварии: Научное приложение D к Докладу НКДАР ООН 2008 года Генеральной Ассамблее. Нью-Йорк: Организация Объединенных Наций, 2011. 174 с.
4. Майстренко Т.А., Белых Е.С., Трапезников А.В., Зайнуллин В.Г., Вахрушева О.М. Оценка экологического риска радиационного воздействия для природных экосистем, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2013. Т. 3, № 15. С. 41-46.
5. Радиационно-гигиенический паспорт территории Орловской области, 2018 год. Орел: Администрация Орловской области, 2018.
6. Булдаков Л.А., Филюшкин И.В., Эйдус Л.Х., Яромоненко С.П. Чернобыль вчера, сегодня, завтра ... М.: ИздАТ, 1994. 122 с.
7. Иванов С.И., Симонова В.Г. Здоровье и проблемы обеспечения радиационной безопасности населения Орловской области от природного облучения. Материалы XXXIX научной конференции «Хлопинские чтения» по теме «Здоровье населения в современной среде обитания». СПб., 2006. С. 13-15.
8. Симонова В.Г. Сравнительная оценка риска от воздействия на население Орловской области различных источников ионизирующего излучения. Сборник докладов и тезисов международной научно-практической конференции «Современные проблемы обеспечения радиационной безопасности населения». СПб., 2006. С. 73-75.
9. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2011 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения по постановлению Правительства Российской Федерации № 1582 от 18 декабря 1997 года «Об утверждении Перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС»: информ. сб. – СПб: ФБУН НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева (письмо ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева «О пересмотре перечня населенных пунктов»), 2011.
10. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2014 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения по постановлению Правительства Российской Федерации №1582 от 18 декабря 1997 года «Об утверждении Перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС»: информ. сб. СПб: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2014.
11. Онищенко Г.Г., Романович И.К. Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе // *Радиационная гигиена*. 2014. Т. 7, № 4. С. 5-13.
12. Ашитко А.Г., Золочевский Д.В., Овсянникова Л.В., Рожкова С.А. Радиационная обстановка на территории Калужской области 30 лет спустя после аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная гигиена*. 2016. Т. 9, № 2, С. 40-47.
13. Бортновский В.Н., Нараленков В.А. Методические подходы к оценке риска проживания населения на радиоактивно загрязненных территориях и разработке мер по его снижению // *Проблемы здоровья и экологии*. 2005. Т. 1, № 3. С. 7-15.

Поступила: 06.05.2020 г.

**Симонова Виктория Геннадьевна** – кандидат медицинских наук, доцент кафедры общественного здоровья, здравоохранения и гигиены, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95; E-mail: segeja36@mail.ru

**Бубликова Людмила Ивановна** – доктор биологических наук, доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой общественного здоровья, здравоохранения и гигиены, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Орёл, Россия

**Для цитирования: Симонова В.Г., Бубликова Л.И. Ретроспективный анализ радиационной обстановки на территории Орловской области // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 67-73. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-67-73**

## Retrospective analysis of the radiation situation in the territory of the Oryol region

Viktoriya G. Simonova, Lyudmila I. Bublikova

Oryol State University named after I. Turgenev of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Oryol, Russia

*The article considers the radiation situation in the Oryol region 33 years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Since 1998, certification has made it possible to assess the main indicators of the radiation situation in the region and conduct a comparative analysis, evaluate the doses of the population from all the main sources and the effects of the radiation factor on public health, and determine the most significant directions for reducing the doses of the population. The contribution of man-made sources to the collective dose to the population of the Oryol region in 2017 was 0.73% according to radiation-hygienic certification, which is 3 times higher than in Russia (0.24%). This is primarily due to radioactive contamination of a part of the region after the Chernobyl accident. The Oryol region is one of fourteen oblasts of the Russian Federation affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. As a result of this disaster, 22 out of 24 districts of the Oryol Oblast (about 40% of the oblast's territory) were exposed to radioactive contamination to one degree or another. Differences in precipitation led to the formation of extremely spotted pollution in the Oryol region. 1243 people from the Oryol region took part in the liquidation of the Chernobyl accident. 43% of them became disabled I, 2 and 3 groups, 115 people (9%) died within 14 years after these events. In the Oryol region, the radiation environment remains stable. The radiation background is between 0.12 and 0.19  $\mu\text{Sv/h}$ , which corresponds to the values characteristic of the Oryol region before the Chernobyl accident. Comparison of radiation doses due to additional radiation for the 1st and 33rd years after the accident showed a 51-fold decrease due to the physical decay of long-lived radioisotopes and short-lived radionuclides, as well as their burial in the soil.*

**Key words:** radiation situation, Oryol region, Chernobyl accident, Cs-137, effective doses to the population.

## References

- Korsakov AV, Yablokov AV, Troshin VP, Pugach LI, Sidorov IV, Zhilin AV, et al. Dynamics of the frequencies of the congenital malformations of the pediatric patients of the Bryansk region, residing in the conditions of the radioactive contamination (1991-2012). *Zdravookhraneniye RF = Healthcare of the Russian Federation*. 2014; 6: 49-53 (In Russian).
- Polyakova EV, Simonova VG. Hygienic assessment of dose loads on the population of the Oryol region from socially significant sources of ionizing radiation. In: Collection of reports and theses of the scientific-practical conference «Role, problems and tasks of radiation-hygienic certification in ensuring radiation safety of the population». Saint-Peterburg; 2005; №1. 60 p. (In Russian).
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. New York: United Nations; 2011. 174 p. (In Russian).
- Maystrenko TA, Belykh ES, Trapeznikov AV, Zaynullin VG, Vakhrusheva OM. Assessment of the ecological risk of the radiation exposure for the natural ecosystems contaminated due to the Chernobyl NPP accident. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN = Komi news of the scientific center of UrO RAS*. 2013; 3(15):41-46 (In Russian).
- Radiation-hygienic passport of the territory of the Oryol region, 2018. Oryol: Administration of the Oryol region, 2018. (In Russian).
- Buldakov LA, Filyushkin IV, Eydus LKh, Yarmonenko SP. Chernobyl yesterday, today, tomorrow... Publishing House «IzdAT». Moscow; 1994. 122 p. (In Russian).
- Ivanov SI, Simonova VG. Health and problems of ensuring radiation safety of the population of the Oryol region from natural radiation. In: Materials of the XXXIX scientific conference «Khlopin readings» on the topic «Health of the population in the modern environment». Saint-Petersburg; 2006. №1. 13 p. (In Russian).
- Simonova VG. A comparative assessment of the risk from exposure to the population of the Oryol region of various sources of ionizing radiation. In: Collection of reports and theses of the international scientific-practical conference «Modern problems of ensuring the radiation safety of the population». Saint-Petersburg; 2006. №1. 73 p. (In Russian).
- The average annual effective dose in 2011 of residents of settlements of the Russian Federation assigned to zones of radioactive contamination by decree of the Government of the Russian Federation No. 1582 of December 18, 1997 «On approval of the List of settlements located within the boundaries of zones of radioactive contamination as a result of the Chernobyl disaster NPP»: inform. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG named after prof. P.V. Ramzaev, 2011 (the letter from NIIRG named after prof. P.V. Ramzaev «On the revision of the list of settlements»). (In Russian).
- The average annual effective dose in 2014 of residents of settlements of the Russian Federation assigned to zones of radioactive contamination by decree of the Government of the Russian Federation No. 1582 of December 18, 1997 «On approval of the List of settlements located within the borders of zones of radioactive contamination due to the Chernobyl disaster NPP»: inform. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG them. prof. P.V. Ramzaev, 2014. (In Russian).
- Onischenko GG, Romanovich IK. The radiation situation in the Kaluga region 30 years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 5-13 (In Russian).
- Ashitko AG, Zolochevsky DV, Ovsyannikova LV, Rozhkova SA. The radiation situation in the Kaluga region 30 years

Viktoriya G. Simonova

Oryol State University named after I. Turgenev

Address for correspondence: Komsomolskaya str., 95, Oryol, 302026, Russia; E-mail: segeja36@mail.ru

after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(2): 40-47 (In Russian).

13. Bortnovsky VN, Naralnikov VA. Methodological approaches to assessing the risk of population living in radioactively con-

taminated territories and developing measures to reduce it. *Problemy zdorovya i ekologii = Issues of health and ecology*. 2005;1(3): 7-15 (In Russian).

Received: May 06, 2020

**For correspondence: Viktoriya G. Simonova** – Ph.D., assistant professor of public health, healthcare and hygiene; Oryol State University named after I.S. Turgenev of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Komsomolskaya str., 95, Oryol, 302026, Russia; E-mail: segeja36@mail.ru)

**Lyudmila I. Bublikova** – Doctor of Biological Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head. Department of Public Health, Health and Hygiene; Oryol State University named after I.S. Turgenev of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Oryol, Russia

**For citation: Simonova V.G., Bublikova L.I. Retrospective analysis of the radiation situation in the territory of the Oryol region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 67-73. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-67-73**

## Исследование возможности использования искусственной нейронной сети для распознавания и оценки вклада отдельных радионуклидов в суммарный бета-спектр

В.С. Репин

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

*Целью работы является исследование возможности применения искусственной нейронной сети для идентификации и количественной оценки содержания отдельных радионуклидов в суммарном бета-спектре. Нейронная сеть реализована средствами Matlab R2020b. Для исследования использована однослойная нейронная сеть прямого распространения с одним невидимым слоем из 10 нейронов и 3 выходами (по числу радионуклидов). Для тестирования и изучения возможностей искусственной нейронной сети были выбраны 3 гладких модельных спектра –  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , полученные на жидкостном спектрометре Quantulus 1220. Результаты исследования показали, что нейронные сети являются эффективным методом распознавания вклада отдельного радионуклида или установления его наличия в суммарном бета-спектре. Точность оценки вклада зависит от гладкости спектра и не превышает 30%, для вкладов более 10%, что вполне пригодно для практического использования. Для «зашумленных» спектров метод может использоваться для предварительной оценки вкладов отдельных радионуклидов в суммарный спектр, окончательное значение которых может быть рассчитано методами минимизации при подгонке формы измеренного и распознаваемого спектра.*

**Ключевые слова:** нейронные сети, жидкостная бета-спектрометрия, декомпозиция спектра, обучающая выборка, достоверность.

### Введение

Задача определения радионуклидного состава исследуемого образца в спектрометрии, включая бета-спектрометрию и бета-радиометрию, является традиционной, широко распространенной и практически реализованной.

Существует большое количество компьютерных программ («SpectralLine» – разработки ООО «ЛСРМ» [1], «ASW» – разработки НТЦ «РАДЭК» [2], «СПЕКТР» – [3], «Прогресс» – разработки ООО «НТЦ Амплитуда» [4], SpectraDec [5] и др.), предназначенных для расшифровки бета-спектров, полученных на твердотельных и жидкостных детекторах, как с известным, так и с неизвестным радионуклидным составом. Бета-спектрометрия в ряде случаев позволяет избежать сложных и трудоемких радиохимических исследований.

Традиционные алгоритмы расшифровки бета-спектров, нашедшие наибольшее распространение в последние годы, основаны на использовании метода наименьших квадратов (МНК). Для реализации данного метода необходимо располагать библиотекой эталонных радионуклидов, которые предположительно находятся в счетном образце. Суть метода состоит в построении из эталонных спектров суммарного модельного спектра,

максимально близкого по форме к измеренному спектру. Это достигается путем подбора оптимального набора весовых коэффициентов с использованием компьютерных алгоритмов минимизации [6–11]. Несмотря на достоинства МНК, успех его реализации зависит от соотношения полезных и фоновых составляющих спектра и идентичности набора радионуклидов в модельном и измеренном спектрах. МНК по своей природе формален, и вне зависимости от формы измеренного спектра всегда найдется решение, которое с формальной точки зрения будет оптимальным [11], что нередко происходит при неверно выбранных начальных условиях.

В последнее время все более пристальное внимание специалистов приковано к практическому применению искусственных нейронных сетей. Искусственная нейронная сеть (ИНС) – это математическая модель и её программное обеспечение, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей, наподобие клеток головного мозга [11–25]. Важнейшим свойством нейронных сетей, по сравнению с программами, работающими на основе алгоритмов, является возможность обучения. Суть обучения заключается в поиске оптимальных коэффициентов связи между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть спо-

Репин Виктор Степанович

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

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

собна узнавать объекты, речь, выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными. В случае успешного обучения сеть может дать правильный ответ даже в случае нечетких входных данных [20].

В научной литературе имеется ограниченное число работ по использованию ИНС для распознавания бета-спектров радионуклидов. В публикациях [26–28] приведены примеры использования ИНС для мониторинга спектра пучка электронов промышленного ускорителя электронов. В работе [28] предложено использовать ИНС для создания объединённой базы жидко-сцинтилляционных спектров, позволяющей учесть индивидуальные особенности приборов и создать библиотеку калибровочных спектров для конкретного прибора или его модификации.

Особенностью бета-спектров является их непрерывность в диапазоне энергий от нуля до максимальной, граничной энергии. Признаками для распознавания отдельных радионуклидов, полученных методом жидкостной спектрометрии, могут быть: верхняя граница бета-спектра, форма бета-спектра, пики конверсионных электронов, изгибы, связанные с присутствием в спектре материнских и дочерних радионуклидов, которые совместно определяют уникальную форму суммарного спектра.

**Цель исследования** – оценить возможности практического применения ИНС для выявления и количественной оценки вкладов отдельных радионуклидов в суммарном бета-спектре.

### Материалы и методы

Методический раздел данного исследования включал:

- выбор ИНС и среды моделирования;
- подготовку обучающей выборки и обучение ИНС;
- тестирование ИНС.

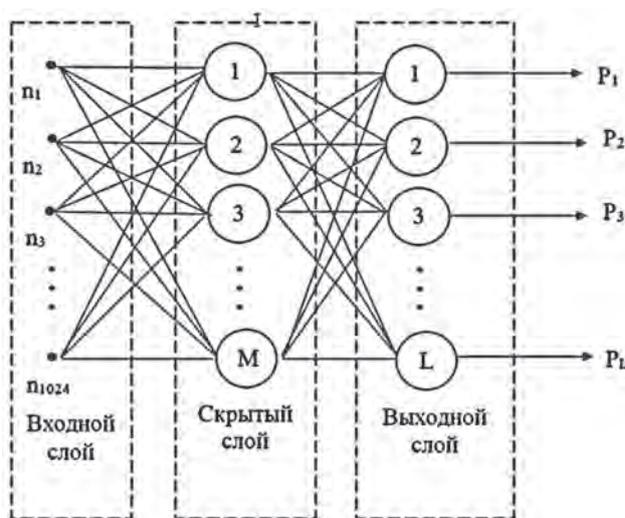
#### Выбор архитектуры ИНС и среды моделирования

Сформулированный выше тип задачи относится к задачам идентификации, то есть к выделению в рассматриваемом массиве данных характерных признаков, позволяющих связать их с конкретными цифровыми образами (в нашем случае с бета-спектрами радионуклидов).

К решению данного типа задач лучше всего применимы нейронные сети прямого распространения (НСПР) [21–23], общий вид которых показан на рисунке 1.

Нейронные сети прямого распространения передают информацию от входа к выходу. Входными данными в нашем случае является количество импульсов в каналах анализатора, а выходными – весовые коэффициенты вклада идентифицированных спектров радионуклидов в суммарный спектр. НСПР обычно обучается по методу обратного распространения ошибки. Ошибка является разницей между входом и выходом. Если у сети есть достаточное количество скрытых нейронов, она теоретически способна смоделировать взаимодействие между входными и выходными данными.

Современные вычислительные средства облегчают задачу построения нейросети, поскольку имеют встроенные блоки, позволяющие сформировать нужную конфигурацию нейросети. В данной работе для построения ИНС, ее обучения и последующего изучения свойств был выбран MATLAB R2020b.



**Рис. 1.** Общий вид нейронной сети прямого распространения с одним скрытым слоем  
**[Fig. 1.** General view of a feedforward neural network with one hidden layer]

Среда MATLAB включает широкий набор инструментов, одним из которых является Neural Network Toolbox (NNT), который содержит средства для разработки и визуализации нейронных сетей. NNT обеспечивает поддержку типовых задач. Средства анализа и моделирования MATLAB позволяют быстро оценивать качество окончательного результата распознавания [28–34].

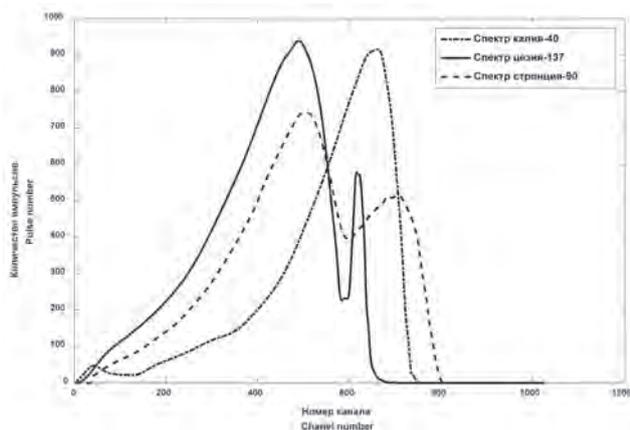
Для создания ИНС и ее тестирования в программной среде MATLAB была выбрана однослойная нейронная сеть прямого распространения feed forward neural net (FFNN) с одним невидимым слоем. Настройка сети состояла в определении количества входов и выходов, а также количества нейронов в скрытом слое. Для тестирования была построена конфигурация сети, состоящая из 1024 входных сигналов (по числу каналов в бета-спектре) и 3 выходов – количество радионуклидов, представленных в тестируемой выборке.

Оптимальное количество нейронов скрытого слоя –  $M$  первоначально определялось по правилу геометрической пирамиды, предложенной в работе [25]:  $M = \sqrt{1024 \cdot 3} \approx 55$ , однако оперативная память компьютера не позволила произвести обучение ИНС для 55 нейронов, поэтому обучение и тестирование было произведено для 10 нейронов скрытого слоя.

#### Подготовка обучающей выборки и обучение ИНС

Для тестирования и изучения возможностей ИНС из числа имеющихся спектров были отобраны 3 наиболее гладких бета-спектра  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , полученные ранее на жидкостном спектрометре Quantulus-1220. Форма этих спектров показана на рисунке 1. Особенностью регистрации и вывода спектров на Quantulus-1220 является логарифмическая шкала преобразования амплитуды сигнала в номер канала регистрации. Такой способ регистрации, как это видно из рисунка 2, позволяет растянуть начальную область спектра.

Обучающая выборка состояла из двух массивов данных: массива, включающего 10 тысяч спектров, содер-



**Рис. 2.** Форма модельных спектров  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , используемых для обучения искусственной нейронной сети (ИНС)

[Fig. 2.  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  reference spectra used for artificial neural network (ANN) training]

[Legend (top down): Spectrum of  $^{40}\text{K}$ ; Spectrum of  $^{137}\text{Cs}$ ; Spectrum of  $^{90}\text{Sr}$ ]

жащих радионуклиды, весовые коэффициенты которых в диапазоне от 0 до 1 устанавливались случайным образом, и массива, который содержал наборы весовых коэффициентов для соответствующих спектров первого массива. Данный объем выборки обеспечил высокую плотность заполнения диапазона весовых коэффициентов и последующую корректную оценку точности ИНС.

Суть обучения заключалась в том, чтобы предъявить на вход ИНС спектр, состоящий из смеси перечисленных выше радионуклидов, и сообщить ИНС вклад каждого радионуклида в данный спектр.

По окончании обучения ИНС была готова для тестирования и использования, а результатом ее работы становилось выявление и оценка вкладов радионуклидов в произвольном спектре смеси перечисленных радионуклидов.

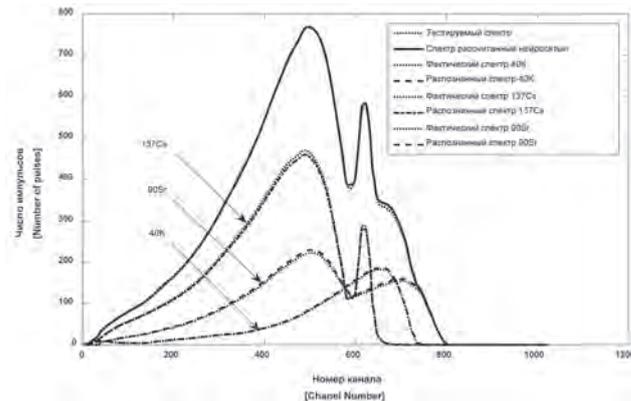
На рисунке 3 показан пример работы ИНС при распознавании вкладов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с соотношением 0,2:0,5:0,3. Полученный в результате идентификации радионуклидов суммарный спектр показан на рисунке 3 сплошной линией. Из данного примера видно вполне удовлетворительное совпадение идентифицированных и тестируемых спектров радионуклидов и их сумм.

*Тестирование свойств ИНС после обучения*

В зависимости от активности радионуклидов в счетных образцах, времени набора спектров формы спектров различаются степенью гладкости.

Целью тестирования ИНС является оценка точности распознавания в суммарном спектре вкладов отдельных радионуклидов при их случайном соотношении.

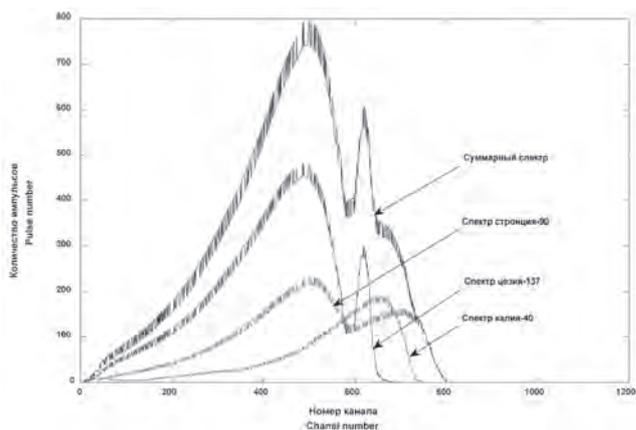
Исследование было выполнено как для гладких, так и для «зашумленных» спектров, то есть спектров, в которых число импульсов в каждом канале изменялось случайным образом. Пример «зашумленных» спектров показан на рисунке 4.



**Рис. 3.** Пример распознавания искусственной нейросетью вкладов отдельных радионуклидов в тестируемый сглаженный спектр

[Fig. 3. An example of recognition by an artificial neural network (ANN) of the contributions of individual radionuclides to the tested smoothed spectrum]

[Legend (top down): Tested spectrum after smoothing; Actual spectrum of  $^{40}\text{K}$ ; Recognized spectrum of  $^{40}\text{K}$ ; Actual spectrum of  $^{137}\text{Cs}$ ; Recognized spectrum of  $^{137}\text{Cs}$ ; Actual spectrum of  $^{90}\text{Sr}$ ; Recognized spectrum of  $^{90}\text{Sr}$ ; Spectrum, based on ANN recognition]



**Рис. 4.** Пример статистического «зашумления» спектров

[Fig. 4. An example of statistical «noising» of spectra  
Legend (top down): Summary spectrum; Strontium-90 spectrum; Caesium-137 spectrum; potassium-40 spectrum]

Тестирование проведено для 3 вариантов композиции суммарных тестируемых спектров:

- композиция гладких спектров;
- композиция спектров с «зашумлением» числа импульсов в каналах анализатора;
- композиция спектров с «зашумлением» и последующим сглаживанием суммарного спектра.

Для каждого варианта тестирования ИНС создавался массив суммарных спектров, формируемых в соответствии со следующим соотношением:

$$Sum_{sp} = k_K \cdot sp_K + k_{Cs} \cdot sp_{Cs} + k_{Sr} \cdot sp_{Sr}, \quad (1)$$

где

$k_K$ ,  $k_{Cs}$ ,  $k_{Sr}$  – коэффициенты вкладов радионуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в суммарный спектр  $Sum_{sp}$ ;

$sp_K, sp_{Cs}, sp_{Sr}$  – эталонные гладкие спектры  $^{40}K, ^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$ .

Коэффициенты  $k_K, k_{Cs}, k_{Sr}$  были получены с помощью генератора случайных чисел в диапазоне от 0 до 1.

Результатом тестирования ИНС стал массив распознанных вкладов размером  $10\,000 \times 3$ .

Точность распознавания оценивалась посредством расчета абсолютной величины относительной ошибки разницы между тестируемым и распознанным вкладом по формуле:

$$Error_{rn} = \frac{Abs(K_{rn}^{Recogn} - K_{rn})}{K_{rn}} * 100\%, \quad (2)$$

где

$Error_{rn}$  – абсолютная величина относительной ошибки разницы между тестируемым  $K_{rn}$  и распознанным  $K_{rn}^{Recogn}$  вкладом радионуклида «гп»

Моделирование случайного числа импульсов в  $i$ -м канале анализатора –  $N_{rand(i)}$  для варианта тестирования 2 осуществлялось по формуле:

$$N_{rand(i)} = K_{rn} \cdot N_{sp(i)} + rnd(i) \cdot \sqrt{K_{rn} \cdot N_{sp(i)}}, \quad (3)$$

где

$K_{rn}$  – тестируемый коэффициент вклада спектра «гп» в суммарный спектр;

$N_{sp(i)}$  – число импульсов в  $i$ -м канале спектра;

$rnd(i)$  – значения, равные -1 или +1, если  $rnd(i)$  меньше 0,5 или больше 0,5 соответственно, и равные 0 при значении  $rnd(i) = 0$ .

Для третьего варианта тестирования спектры, полученные по варианту 2, подвергались процедуре сглаживания методом скользящей средней.

Надежность метода распознавания вкладов с использованием ИНС оценивалась по величине ошибки разницы между распознанным вкладом отдельного радионуклида и значением, заданным при тестировании. Были выделены следующие диапазоны ошибок:

- менее 10%;
- от 10 до 30%;
- от 30 до 100%;

– более 100%.

Результаты тестирования для всех трех вариантов формирования тестируемых спектров представлены в таблице.

Из таблицы видно, что наибольшая точность распознавания вкладов радионуклидов реализуется для варианта 1 – гладких спектров, для которых доля спектров, вклады которых определены с ошибками менее 10% (высокая точность), лежит в интервале от 90 до 99%. Доля спектров с ошибками менее 30% (приемлемая точность) не превышает 7,3%, а доля спектров с ошибками распознавания вкладов более 100% (ориентировочные значения вкладов) составляет доли процента.

Точность распознавания вкладов спектров, сформированных по варианту 2, невелика. В приемлемый диапазон точности до 30% попадает 72% спектров  $^{40}K$ , 32%  $^{137}Cs$  и 39%  $^{90}Sr$ .

Сглаживание спектров (вариант 3) повышает точность распознавания в 1,2–2,3 раза по сравнению с вариантом 2: 88% для  $^{40}K$ , 75% для  $^{137}Cs$  и 70% для  $^{90}Sr$ , поэтому такой способ предварительной подготовки спектра является весьма эффективным. Доля спектров с приемлемой и ориентировочной точностью распознавания вкладов при третьем варианте обработки спектров достигает 90%.

#### Исследование точности и линейности распознавания вклада радионуклида в суммарный спектр в зависимости от величины вклада

Приведенные в таблице результаты дают общее представление о процентах, распознанных с приемлемой и ориентировочной точностью вкладов, но не дают ответа на вопрос, как ошибка распознавания связана с величиной вклада и является ли связь между тестируемым и распознанным вкладом линейной. Пример результата такого исследования для зашумленных спектров  $^{137}Cs$  представлен на рисунке 5. Из рисунка 5 видно, что связь между распознанными и тестируемыми значениями вкладов описывается уравнением линейной регрессии  $y=1,003 \cdot x - 0,03$ . Коэффициент корреляции равен 0,97.

Таблица

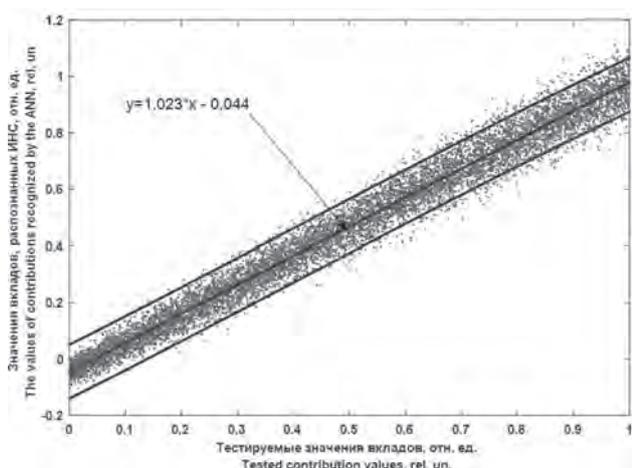
Распределение процентной доли распознанных вкладов радионуклидов в зависимости от ошибки распознавания, %

[Table

Distribution of the percentage of recognized contributions of radionuclides depending on the recognition error, %]

Радионуклид [Radionuclide]	Диапазон ошибок, [Error range] %	Вариант тестируемого спектра [Spectrum Test Variant]		
		Вариант 1. Смесь эталонных спектров (гладкий спектр), % [Variant 1. A mixture of reference spectra (smooth spectrum), %]	Вариант 2. Смесь эталонных спектров с моделированием случайного числа импульсов в каналах анализатора, % [Variant 2. A mixture of reference spectra with modeling a random number of pulses in the analyzer channels, %]	Вариант 3. Смесь эталонных спектров со сглаживанием случайного числа импульсов в каналах анализатора, % [Variant 3. A mixture of reference spectra with smoothing a random number of pulses in the analyzer channels, %]
$^{40}K, \%$	<10	99,48	25,98	<b>69,80</b>
	10–30	0,40	35,75	<b>18,08</b>
	30–100	0,08	27,10	8,42
	>100	0,04	11,17	3,70

Радионуклид [Radionuclide]	Диапазон ошибок, [Error range] %	Вариант тестируемого спектра [Spectrum Test Variant]		
		Вариант 1. Смесь эталонных спектров (гладкий спектр), % [Variant 1. A mixture of reference spectra (smooth spec- trum), %]	Вариант 2. Смесь эталонных спектров с моделированием случайного числа импульсов в каналах анализатора, % [Variant 2. A mixture of reference spectra with modeling a random num- ber of pulses in the analyzer channels, %]	Вариант 3. Смесь эталонных спектров со сглаживанием случайного числа импульсов в каналах анализатора, % [Variant 3. A mixture of reference spectra with smoothing a random number of pulses in the analyzer channels, %]
<sup>137</sup> Cs	<10	89,43	11,10	<b>39,45</b>
	10–30	7,26	20,92	<b>35,99</b>
	30–100	2,41	39,54	18,75
	>100	0,90	28,44	5,81
<sup>90</sup> Sr	<10	97,59	15,69	<b>36,95</b>
	10–30	1,70	23,53	<b>32,58</b>
	30–100	0,46	34,66	22,37
	>100	0,25	26,13	8,10

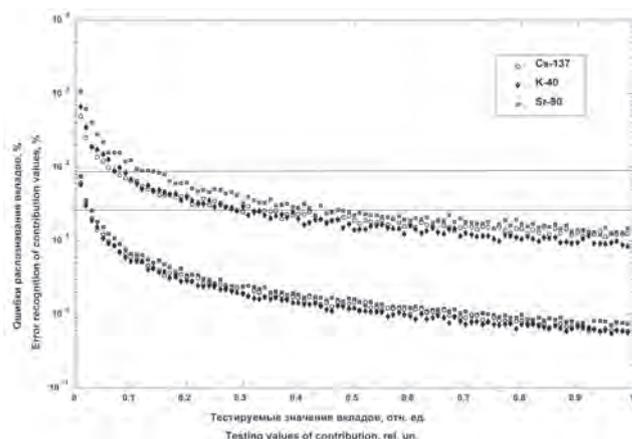


**Рис. 5.** Соотношение между тестируемым и распознаваемым вкладом <sup>137</sup>Cs в суммарный спектр  
[Fig. 5. The relationship between the tested and recognized contribution of <sup>137</sup>Cs to the summary spectrum]

Аналогичные уравнения регрессии, описывающие тесную линейную связь между распознанными и тестируемыми значениями вкладов, получены для <sup>40</sup>K и <sup>90</sup>Sr.

Исследование зависимости ошибки распознавания от величины вклада показало (рис. 6), что для сглаженных спектров с моделированием случайного числа импульсов в каналах анализатора для вкладов в диапазоне от 0,1 до 0,3 ошибка может достигать 30–100% и превышает 100%, если вклад менее 0,1. Для гладких модельных спектров, из которых был составлен суммарный спектр, ошибки распознавания существенно меньше и превышают 30% только при вкладах менее 0,02.

Результаты выполненного исследования показали, что нейронные сети являются вполне эффективным методом распознавания отдельных радионуклидов в суммарном бета-спектре. Более высокая точность распознавания



**Рис. 6.** Зависимость ошибки распознавания вкладов радионуклидов в суммарный спектр в зависимости от их величины (верхние кривые – с моделированием случайного числа импульсов; нижние кривые – гладкие эталонные спектры)  
[Fig. 6. The error of recognition of the radionuclides contributions to the summary spectrum depending on the value of contribution (upper curves – with modeling of a random number of pulses; lower curves – smooth etalon spectra)]

с ошибкой менее 30% достигается при использовании гладких или сглаженных спектров. Учитывая, что для практических целей точность оценки вклада отдельного радионуклида 30% является приемлемой, метод ИНС позволяет уверенно идентифицировать весовой вклад в суммарный спектр отдельного радионуклида, начиная с относительного вклада 10%.

Для негладко очерченных, «зашумленных» спектров метод ИНС может быть рекомендован для предварительной оценки вкладов радионуклидов с последующим уточнением этих вкладов итерационными методами минимизации методом наименьших квадратов.

### Выводы

Результаты исследования возможностей искусственной нейронной сети в распознавании вкладов отдельных радионуклидов в суммарном бета-спектре показали:

1. Точность распознавания вклада радионуклида в суммарный бета-спектр с помощью искусственной нейронной сети зависит от гладкости спектра и относительного вклада радионуклида в суммарный спектр. Для гладких спектров вклады на уровне 0,02 уверенно идентифицируются с ошибкой до 30%, а для статистически зашумленных спектров – на уровне 0,2 с ошибкой до 100%.

2. Точность распознавания вклада радионуклидов при сглаживании спектров позволяет снизить ошибку распознавания в 1,2–2,3 раза, что позволяет расширить возможности ИНС для распознавания.

3. Искусственные нейронные сети могут успешно использоваться для расшифровки бета-спектров.

4. Наряду с идентификацией радионуклидов и оценкой их вклада, искусственная нейронная сеть может использоваться для предварительной оценки вкладов радионуклидов в статистически «зашумленных» спектрах в качестве начальных условий с последующим уточнением этих вкладов методом наименьших квадратов в процессе окончательной подгонки теоретического и измеренного спектра.

### Литература

1. Официальный сайт лаборатории спектрометрии и радиометрии (ЛСРМ). URL: [http://www.lsrn.ru/products/detail.php?ELEMENT\\_CODE=spectraline\\_1.6/](http://www.lsrn.ru/products/detail.php?ELEMENT_CODE=spectraline_1.6/) (Дата обращения 20.10.2020).
2. Официальный сайт ООО «Научно-Технический Центр «РАДЭК». URL: <https://www.radek.ru/product/Programmnoe-obespechenie/95/> (Дата обращения 20.10.2020).
3. Официальный сайт ООО «Спектр». URL: <http://spectrad.ru/> (Дата обращения 20.10.2020).
4. Официальный сайт ООО «НТЦ Амплитуда». URL: <http://amplituda.ru/catalog/radiatsionnyy-kontrol/programmnoe-obespechenie/> (Дата обращения 20.10.2020).
5. Официальный сайт компании «TALS OY». URL: <https://www.tals.eu/spectradec> (Дата обращения 20.10.2020).
6. Ермаков А. И., Каширин И. А., Малиновский С. В., Соболев А. И., Тихомиров В. А. Жидкосцинтилляционная  $\beta$ – $\alpha$ -спектрометрия // Атомная энергия. 2002. Том 92, вып. 1. С. 68–75.
7. Kashirin I.A., Ermakov A.I., Malinovsky S.V., et al. Liquid scintillation determination of low level components in complex mixtures of radionuclides // Appl. Rad. Isot. 2000. Vol. 53. P. 303-308.
8. Belanov S.V., Kashirin I.A., Malinovsky S.V., et al. Method for identifying radionuclides in probes using a liquid scintillation sensor. PCT № 94/30185.
9. Беланов С.В., Каширин И.А., Малиновский С.В., и др. Способ идентификации радионуклидов с помощью жидкосцинтилляционного счетчика. Пат. № 2120646 (приоритет от 08.12.97).
10. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». Москва, 2016.
11. Ососков Г.А., Полянский А., Пузынин И.В. Современные методы обработки экспериментальных данных в физике высоких энергий // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2002. Т. 33, вып. 3. С. 676-745.
12. Вакуленко С.А., Жихарева А.А. Практический курс по нейронным сетям. СПб: Университет ИТМО, 2018. 71 с.
13. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. М.: ИПРЖР, 2000. 241 с.
14. Галушкин А.И., Цыпкин Я.З. Нейронные сети: история развития. М.: ИПРЖР, 2002. 735 с.
15. Гаскаров Д.В. Интеллектуальные информационные системы. Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 413 с.
16. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. М.: ИПРЖР, 2001. 256 с.
17. Девятков В.В. Системы искусственного интеллекта. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2001. 352 с.
18. Джексон П. Экспертные системы. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 624 с.
19. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры. М.: МГТУ Баумана, 2004. 400 с.
20. Кисель И.В., Нескоромный В.Н., Ососков Г.А. Применение нейронных сетей в экспериментальной физике // ЭЧАЯ. 1993. Т. 24, вып. 6. С. 1551-1595.
21. Ососков Г.А. Пальчик В.В., Потребенников Ю.К., и др. Использование нейронных сетей для улучшения интерпретации эксперимента EXCHARM // Матем. моделир. 1999. Т. 11, вып. 10. С. 116-126.
22. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М.: Горячая линия Телеком, 2002. 94 с.
23. Кириченко А.А. Нейропакеты – современный интеллектуальный инструмент исследователя // Сетевое электронное издание учебного пособия, 2013. 297 с.
24. Брилюк Д.В., Старовойтов В.В. Распознавание человека по изображению лица нейросетевыми методами. Препринт. Ин-т техн. Кибернетики НАН Беларуси; No 2. Минск, 2002. 54 с.
25. Masters T. Practical Neural Network Recipes in C++. Morgan Kaufmann, 1993. 493 p.
26. Baiev O., Lazurik V. Advantages of neural networks for deriving an electrons spectrum from depth-charge curve. «IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference», Conference Publications, Valencia, Spain. 2011. P. 1395-1397.
27. Baiev O., Lazurik V., Didenko I. Use of Neural Networks for Monitoring Beam Spectrum of Industrial Electron Accelerators. International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications (ICTERI), 2013.
28. Малиновский С.В., Каширин И.А., Тихомиров В.А. Создание объединённой библиотеки спектров жсс tricarb. Сборник материалов XVI ежегодного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ», Обнинск, ГЦИПК, 2010. С. 23-35.
29. Николаева С.Г. Нейронные сети. Реализация в Matlab: учебное пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. 92 с.
30. Дьяконов В.В. Matlab 6: Учебный курс. СПб.: Питер, 2002. 672 с.
31. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.
32. Ковалев С.М., Хатламаджиян А.Е. Моделирование искусственных нейронных сетей в среде MATLAB: Учебно-методическое пособие к лабораторным работам. Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2008. 35 с.
33. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. М: Диалог-МИФИ, 2002. 496 с.
34. Николаев С.В., Баженов Р.И. Распознавание образов с помощью нейронных сетей в среде MatlabR2009b. 2015. No. 13 (13-2015). URL: <http://nauka-rastudent.ru/13/2355/> (Дата обращения 20.10.2020).

Поступила: 26.10.2020 г.

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

**Для цитирования:** Репин В.С. Исследование возможности использования искусственной нейронной сети для распознавания и оценки вклада отдельных радионуклидов в суммарный бета-спектр // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 74-81. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-74-81

## Study of the possibility of using an artificial neural network to recognize and assess the contribution of individual radionuclides to the total beta spectrum

Viktor S. Repin

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

*The aim of this work is to study the possibility of using an artificial neural network for identification and quantitative assessment of the content of individual radionuclides in the total beta spectrum. The neural network implemented by using of Matlab R2020b. A single-layer feedforward neural network with one invisible layer of 10 neurons and 3 outputs (according to the number of radionuclides) was used. To test and study the capabilities of the artificial neural network, 3 smooth model spectra were selected –  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ , obtained on the liquid spectrometer Quantulus 1220. The results of the study showed that neural networks are an effective method for recognizing of the contribution of an individual radionuclide or establishing its presence in the total beta spectrum. The recognition accuracy depends on the smoothness of the spectrum and does not exceed 30% if the share of the radionuclide in the total spectrum is more than 10%, which is quite suitable for practical use. For statistically «noising» spectra, the method can be used to preliminary estimate the weight coefficients of individual radionuclides, the final value of which can be obtained by minimization methods with subsequent statistical criterial fitting of the total spectrum shape.*

**Key words:** neural networks, liquid beta spectrometry, spectrum decomposition, training sample, reliability.

### References

- Official site of the laboratory of spectrometry and radiometry (LSRM). Available from: [http://www.lsrn.ru/products/detail.php?ELEMENT\\_CODE=spectraline\\_1.6/](http://www.lsrn.ru/products/detail.php?ELEMENT_CODE=spectraline_1.6/) [Accessed Nov 20, 2020] (In Russian)
- Official site of Ltd STC [«RADEC»]. Available from: <https://www.radek.ru/product/Programmnoe-obespechenie/95/> [Accessed Nov 20, 2020] (In Russian)
- Official site of Ltd «Spectr». Available from: <http://spectrad.ru/> [Accessed Nov 20, 2020] (In Russian)
- Official site of Ltd [«STC Amplituda»]. Available from: <http://amplituda.ru/catalog/radiatsionnyy-kontrol/programmnoe-obespechenie/> [Accessed Nov 20, 2020] (In Russian)
- Official site of the company «TALS OY». Available from: <https://www.tals.eu/spectradec> [Accessed Nov 20, 2020]
- Ermakov AI, Kashirin IA, Malinovsky SV, Sobolev AI, Tikhomirov VA. Liquid  $\beta$ — $\alpha$ -spectrometry. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2002;92(1): 68–75 (In Russian)
- Kashirin IA, Ermakov AI, Malinovsky SV, Belanov SV, Sapozhnikov YA, Efimov KM, et al. Liquid scintillation determination of low-level components in complex mixtures of radionuclides. *Applied Radiation and Isotopes*. 2000;53(1–2): 303–308.
- Belanov SV, Kashirin IA, Malinovsky SV, et al. Method for identifying radionuclides in probes using a liquid scintillation sensor. PCT № 94/30185.
- Belanov SB, Kashirin IA, Malinovsky SV, et al. Method for the identification of radionuclides using a liquid counter. Pat. № 2120646 (priority date 08.12.97) (In Russian)
- Methods for measuring the activity of radionuclides using a scintillation gamma spectrometer with the «Progress» software. Moscow; 2016. (In Russian)
- Ososkov GA, Polyansky A, Puzynin IV. Modern methods of processing experimental data in high energy physics. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra = Physics of elementary particles and atomic nucleus*. 2002; 33(3): 676–745 (In Russian)
- Vakulenko SA, Zhikhareva AA. Practical course on neural networks. Saint-Petersburg: ITMO University; 2018. 71 p. (In Russian)

**Viktor S. Repin**

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

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

13. Galushkin AI. Theory of neural networks. Moscow: IPRZhR; 2000. 241 p. (In Russian)
14. Galushkin AI, Tsytkin YaZ. Neural networks: history of development. Moscow: IPRZhR; 2002. 735 p. (In Russian)
15. Gaskarov DV. Intelligent information systems. Textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola; 2003. 413 p. (In Russian)
16. Golovko VA. Neural networks: training, organization and application. Moscow: IPRZhR; 2001. 256 p. (In Russian)
17. Devyatkov VV. Artificial intelligence systems. Moscow: Publishing house Bauman Moscow State Technical University; 2001. 352 p. (In Russian)
18. Dzhekson P. Expert systems. Moscow: Williams Publishing House; 2001. 624 p. (In Russian)
19. Komartsova L.G., Maksimov A.V. Neurocomputers. Moscow: Publishing house Bauman Moscow State Technical University; 2004. 400 p. (In Russian)
20. Kisel IV, Neskromnyy VN, Ososkov GA. Application of neural networks in experimental physics. *EChAYA = ECHAYA*. 1993;24(6): 1551-1595 (In Russian)
21. Ososkov GA, Palchik VV, Potrebennikov YuK, Tatishvili GT, Shepelev VB. Using neural networks to improve the interpretation of the EXCHARM experiment. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical modeling*. 1999;11(10): 116-126 (In Russian)
22. Komashinsky VI, Smirnov DA. Neural networks and their application in control and communication systems. Moscow: Telecom hotline; 2002. 94 p. (In Russian)
23. Kirichenko AA. Neuropackages are a modern intellectual tool of the researcher. Online electronic publication of the textbook; 2013. 297 p. (In Russian)
24. Brilyuk DV, Starovoytov VV. Human recognition by facial image using neural network methods. Minsk; 2002. 54 p. (Preprint/Cybernetics University of NAS of Belarus; No 2) (In Russian)
25. Masters T. Practical Neural Network Recipes in C++. Morgan Kaufmann; 1993. 493 p.
26. Baiev O, Lazurik V. Advantages of neural networks for deriving an electrons spectrum from depth-charge curve. «IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference», Conference Publications, Valencia, Spain; 2011. P. 1395-1397.
27. Baiev O, Lazurik V, Didenko I. Use of Neural Networks for Monitoring Beam Spectrum of Industrial Electron Accelerators. International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications (ICTERI), 2013.
28. Malinovsky SV, Kashirin IA, Tikhomirov VA. Creation of a unified library of LSS spectra TRICARB. Collection of materials of the XVI annual seminar «Spectrometric analysis. Hardware and data processing on a PC», Obninsk, GCIPIK; 2010. P. 23-35. (In Russian).
29. Nikolaev SG. Neural networks. Implementation in Matlab: a Tutorial. Kazan: Kazan. State Energ. Univer.; 2015. 92 p. (In Russian).
30. Dyakonov VV. Matlab 6: Tutorial. Saint-Petersburg: Piter; 2002. 672 p. (In Russian).
31. Burakov MV. Neural networks and neurocontrollers: textbook. Saint-Petersburg: GUAP; 2013. 284 p. (In Russian).
32. Kovalev SM, Khatlamadzhiyan AE. Modeling artificial neural networks in MATLAB environment: Study guide for laboratory work. Rostov. St. University of Railway Transport. Rostov; 2008. 35 p. (In Russian).
33. Medvedev VS, Potemkin VG. Neural networks. Matlab 6. Moscow: Dialog-MEPhI; 2002. 496 p. (In Russian).
34. Nikolaev SV, Bazhenov RI. Pattern recognition using neural networks in the MatlabR2009b environment. 2015. No. 13 (13-2015). Available from: <http://nauka-rastudent.ru/13/2355/> [Accessed October 20, 2020]. (In Russian).

Received: October 26, 2020

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

**For citation: Repin V.S. Study of the possibility of using an artificial neural network to recognize and assess the contribution of individual radionuclides to the total beta spectrum. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 74-81. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-74-81**

## Оценка качества измерений объемной активности радона в воздухе помещений. Результаты международных сличительных испытаний

С.М. Киселев<sup>1</sup>, А.М. Маренный<sup>2</sup>, В.Г. Старинский<sup>1</sup>, Ю.С. Бельских<sup>1</sup>, В.В. Шлыгин<sup>1</sup>,  
И.П. Коренков<sup>1</sup>, Н.А. Нефёдов<sup>2</sup>, М.А. Маренный<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна  
Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

<sup>2</sup> Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены  
Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

<sup>3</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Группа компаний РЭИ», Москва, Россия

*В статье представлены результаты международных сличительных испытаний пассивных средств измерения радона в воздухе помещений. Исследования были организованы агентством по защите окружающей среды административной области Пьемонт (г. Ивреа, Италия). Охват участников составил 49 лабораторий из 15 стран мира (Италии, Венгрии, Франции, Великобритании, Литвы, России, Швеции, Испании, Болгарии, Аргентины, Австралии, Финляндии, Ирландии, Греции, Словении). Тестируемые средства измерения включали твердотельные трековые и электретные детекторы. Трековые детекторы представлены преимущественно материалами на основе аллидигликолькарбоната (CR-39) и нитроцеллюлозы (LR-115-2). Пассивные средства измерения радона тестировали в режимах длительного экспонирования с различной объемной активностью радона в воздухе помещений, а также краткосрочного экспонирования в смешанной атмосфере радона и торона. Испытания проводились в реальных условиях эксплуатируемых помещений, с различными климатическими характеристиками. Их основной целью являлась оценка качества результатов определения объемной активности радона испытываемыми средствами измерений в условиях, максимально приближенных к реальным. Показано, что трековые детекторы характеризуются в целом лучшими показателями качества измерений по сравнению с электретными. Наиболее «комфортным» в плане качества получаемых результатов для электретных детекторов оказался режим длительного экспонирования в атмосфере с высоким содержанием радона в воздушной среде помещений. В условиях длительного экспонирования трековые детекторы позволяют получать надежные результаты измерения объемной активности радона в воздухе помещений без существенной потери чувствительности. В работе представлены результаты оценки качества измерений содержания радона в воздухе трековыми экспозиметрами РЭИ-4, которые выпускаются и используются в России для мониторинговых исследований содержания радона в воздухе помещений.*

**Ключевые слова:** радон, РЭИ-4, международные сличения, твердотельные трековые детекторы, электреты, LR-115-2, CR-39.

### Введение

Защита населения от облучения радоном является одной из приоритетных задач радиационной защиты населения от источников природного излучения [1, 2]. Поступая из различных источников, преимущественно из земли, радон накапливается в помещениях, являясь источником облучения легких дочерними продуктами распада. Облучение населения радоном можно контролировать воздействием на пути его поступления из земли в воздух помещений, поэтому содержание радона в воздухе помещений является предметом санитарного-гигиенического контроля. Содержание радона в воздухе помещений подвержено значительным суточным, недельным и сезонным колебаниям и может варьировать в пределах

порядка и более [3, 4]. Высокая вариабельность определяется комплексом климатических и метеорологических факторов (атмосферное давление, соотношение температур воздуха внутри и снаружи здания, ветровой напор, и т.д.), а также режимом эксплуатации помещений. Для достоверного определения среднегодовой объемной активности (ОА) радона в воздухе помещений применяются интегральные методы исследований. В качестве средств измерений в практике радонового мониторинга широко используются электретные, а также твердотельные трековые детекторы на основе различных материалов: поликарбонатов, нитроцеллюлозы, этиленфталата и др. [5–8]. Трековый метод основан на характерном для большинства диэлектриков эффекте, заключающемся

Старинский Виталий Григорьевич

Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна

Адрес для переписки: 123098, Москва, ул. Живописная, 46; E-mail: vitalstar90@mail.ru

в том, что заряженная частица, двигаясь в диэлектрике, теряет вдоль своего пути энергию и образует дефекты в веществе в виде зоны стабильных структурных нарушений вдоль трека ионизации длиной в несколько микрон [8]. Трековый детектор пассивно экспонируется внутри небольшой пробоотборной камеры, в которую радон проникает путем диффузии, что обеспечивает стабильную геометрию облучения детектора за счет альфа-излучения радона и его ДПР внутри этой камеры. После экспонирования трековый детектор подвергается специальному химическому или электрохимическому травлению при фиксированных значениях температуры и pH, в процессе которого латентные треки становятся видимыми. Затем количество треков на поверхности пленки определяется либо оптическим методом, либо подсчетом электрических пробоев в дефектах, связанных с треками. Количество треков пропорционально времени экспонирования и средней ОА радона за это время.

Принцип электретной камеры основан на определении снижения за время экспонирования поверхностного электростатического заряда специальной тefлоновой пластины, экспонируемой в пассивной пробоотборной камере. Перед экспонированием определяется начальный заряд пластины, которая затем помещается в камеру, куда радон попадает в результате диффузии. Радон и образовавшиеся ДПР в результате альфа-распада ионизируют воздух внутри камеры. Возникающие электрические заряды рекомбинируют с зарядами на поверхности пластины, уменьшая ее электростатический потенциал. После экспонирования определяется конечный заряд пластины. Таким образом, величина снижения заряда пластины пропорциональна ОА радона в камере [6].

Основные преимущества интегральных средств измерений заключаются в том, что они позволяют проводить оценку содержания радона в широком временном диапазоне (до 1 года), при этом одновременно может быть охвачено большое количество пунктов контроля (массовые измерения). Для пробоотбора используются компактные, простые и недорогие устройства, не потребляющие электроэнергию.

Применение разных типов детекторов и конструкций пробоотборных камер пассивных средств измерений в практике радонового мониторинга определяет необходимость оценки достоверности получаемых результатов. Эта задача решается в рамках сличительных испытаний. В большинстве случаев подобные испытания проводятся в искусственных условиях в радоновых камерах, где концентрация радона постоянна и не подвержена суточным и сезонным колебаниям, а климатические характеристики (температура, давление и влажность) не выходят за рамки средних значений, характерных для эксплуатируемых жилых помещений [9–11]. Основным алгоритмом проведения сличительных испытаний служит экспонирование испытуемых средств измерений в атмосфере с различной ОА радона. В настоящей работе представлены результаты международных сличительных испытаний (МСИ) пассивных средств измерения радона, отличительной особенностью которых являлось испытание средств измерения в реальных условиях эксплуатируемых помещений, характеризующихся разными климатическими условиями, а также наличием в воздушной среде радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) и торона ( $^{220}\text{Rn}$ ).

### Организация и схема проведения МСИ

МСИ были организованы агентством по защите окружающей среды административной области Пьемонт (г. Ивреа, Италия) для оценки качества определения ОА радона пассивными средствами измерения радона (ПСИР) – твердотельными трековыми экспозиметрами и электретными детекторами, применение которых широко распространено в европейских странах. Материалы трековых детекторов представлены полимерами на основе аллилдигликолькарбоната (CR-39), бисфенола А (Makrofol) и нитроцеллюлозы LR-115-2 (рис. 1).

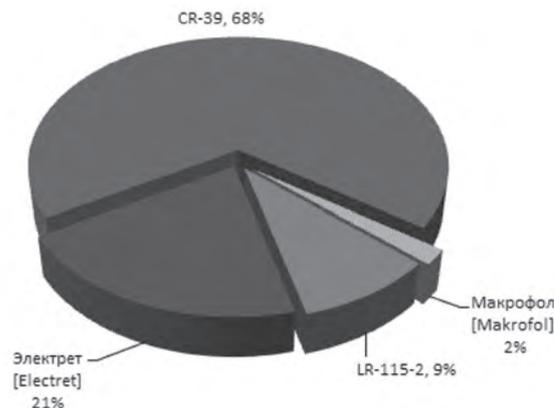


Рис. 1. Типы детекторов, принимавших участие в МСИ  
[Fig. 1. Types of detectors participating in the intercomparison]

Особенностью настоящих МСИ являлось проведение испытаний в реальных эксплуатируемых помещениях (каменные дома провинции Пьемонте, Италия), а не в радоновых камерах со стандартизованными климатическими характеристиками. В испытаниях приняли участие 49 лабораторий из 15 стран мира (Италии, Венгрии, Франции, Великобритании, Литвы, России, Швеции, Испании, Болгарии, Аргентины, Австралии, Финляндии, Ирландии, Греции, Словении). Российские средства измерения были представлены трековыми экспозиметрами из комплекта измерительной аппаратуры «ТРЕК-РЭИ-1М» (Свидетельство об утверждении типа средств измерения ОС.С.38.002.А № 57240 от 21.10.2019), которым был присвоен идентификационный номер 39А (рис. 2).



Рис. 2. Пробоотборная камера РЭИ-4  
[Fig. 2. Passive device REI-4]

В таблице 1 представлены производители ПСИР, которые испытывались в настоящих МСИ.

Таблица 1  
Распределение типов детекторов и пробоотборных камер, представленных в МСИ

[Table 1  
Types of detectors and passive devices participated in the intercomparison]

Тип детектора [Type of detector]	Тип пробоотборной камеры [Passive device]	Производитель [Manufacturer]
Твердотельные трековые [SSNTD]		
CR-39	RSKS	Radosys Ltd.
	Radosure	TASL
	NRPB/SSI	National Radiation Protection Board (NRPB)
	Radout	Intercast
Makrofol DE	Radopurkk	Bayer
	DPR2	ALGADE
LR-115-2	РЭИ-4	Группа компаний РЭИ [Group REI LLC]
	Электретные [Electret]	
Электреты [Electrets]	E-PERM	Rad Elec Inc.

Схема МСИ заключалась в размещении испытуемых средств измерений в трех эксплуатируемых помещениях (по 3 шт. в каждом) с различными уровнями ОА радона в воздухе (табл. 2, рис. 3).



Рис. 3. Экспонирование ПСИР в эксплуатируемых помещениях (г. Ивреа, Италия) [12]  
[Fig. 3. Passive device exposure in premises (Ivrea, Italy)]

Для учета влияния условий транспортирования детекторов на показания испытуемых средств измерений использовали «транспортировочные» детекторы (9 шт.), которые хранились в течение всего периода проведения МСИ в радонозащитных пластиковых упаковках в помещениях с низкой ОА <sup>222</sup>Rn. После экспонирования детекторы выдерживались в течение 3 суток на открытом воздухе вне помещений, упаковывались и отправлялись обратно участнику МСИ для анализа.

Для определения референсных значений ОА радона в исследуемых помещениях применяли радоновые мониторы мировых производителей, основанные на разных принципах детектирования изотопов радона и их дочерних продуктов: AlphaGUARD и AlphaGUARD новой серии DF2000 (Германия), Radim 5B (Чехия), SARAD Thoron Scout (Германия), SARAD EQF 3220 (Германия), Corentium Pro (Норвегия), мониторы на основе сцинтилляционной камеры (ячейки Лукаса).

Характеристика помещений

Таблица 2

Features of the sites]

[Table 2

Контролируемый параметр [Monitored parameter]	Помещение № 1 [Site 1]	Помещение № 2 [Site 2]	Помещение № 3 [Site 3]
Объемная активность радона/торона, Бк/м <sup>3</sup> (референсные значения) [Radon/Thoron concentration, Bq/m <sup>3</sup> (reference values)]	61 ± 13	469 ± 41	2399 ± 394 1685 ± 389*
Коэффициент равновесия [Equilibrium factor]	0,53	0,56	0,15
Мощность дозы гамма-излучения (нГр/ч) [Gamma dose rate nGy/h]	73 ± 7	106 ± 13	953 ± 1196
Высота над уровнем моря (м) [Altitude above sea level (m)]	253	253	846
Температура (°C) [Temperature (°C)]	20,0 ± 0,4	21,0 ± 0,4	13,2 ± 0,3
Давление (гПа) [Pressure (hPa)]	989 ± 1	997 ± 1	916 ± 1
Относительная влажность (%) [Relative humidity (%)]	45 ± 1	52 ± 2	75 ± 2

\* – ОА торона.

Указанные средства измерений калибровали в радоновых и торонных камерах, а также в смешанной атмосфере изотопов радона, согласно стандартизованным процедурам Национального института метрологии и ионизирующего излучения (ЕНЕА-INMRI) [12]. Оценку мощности дозы гамма излучения проводили с помощью термoluminesцентных дозиметров (TLD-100, LiF:Mg,Ti).

Определение ОА радона с применением отечественного комплекта аппаратуры «ТРЕК-РЭИ-1М» проводили в соответствии с методикой измерений «Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом»<sup>1</sup>.

Объемную активность радона рассчитывали по формуле:

$$OA = \frac{OA_0 \cdot (T_{\text{exp}} + T_{\text{тр}}) - OA_{\text{тр}} \cdot T_{\text{тр}}}{T_{\text{exp}}}$$

ОА – объемная активность радона в воздухе исследуемого помещения за период экспонирования, Бк/м<sup>3</sup>;

ОА<sub>0</sub> – объемная активность радона за весь период времени, включая время на транспортировку и хранение экспозиметров, Бк/м<sup>3</sup>;

ОА<sub>тр</sub> – объемная активность радона, рассчитанная для условий хранения и транспортировки экспозиметров, Бк/м<sup>3</sup>;

T<sub>exp</sub> – время экспонирования в воздухе исследуемого помещения, суток;

T<sub>тр</sub> – время, затраченное на хранение и транспортировку экспозиметров, суток.

В соответствии с требованиями Рекомендации МИ 2083-90<sup>2</sup> неопределенность ОА радона в воздухе исследуемых помещений в период экспонирования рассчитана по формуле:

$$\Delta OA = \frac{\sqrt{(\Delta OA_0 \cdot (T_{\text{exp}} + T_{\text{тр}}))^2 + (\Delta OA_{\text{тр}} \cdot T_{\text{тр}})^2}}{T_{\text{exp}}}$$

где Δ – символ расширенной неопределенности ОА радона, полученной в тех или иных условиях.

Для оценки воспроизводимости результатов измерений ОА радона для каждого испытуемого набора ПСИР организаторами МСИ вычислялся коэффициент вариации по формуле:

$$KB = \frac{\sigma}{OA_{cp}}$$

где σ – среднее квадратическое отклонение результатов оценки ОА радона, полученных с применением каждого набора испытуемых средств измерений в тестируемых условиях;

ОА<sub>ср</sub> – среднее арифметическое значение результатов оценки ОА радона, полученных с применением каждого набора испытуемых средств измерений в тестируемых условиях.

Полученный ряд значений коэффициентов вариации группировался в соответствии с типом испытуемых детекторов (трековые и электреты) и тестируемым режимом. В настоящей статье представлены распределения коэффициента вариации, построенные на основе данных организаторов МСИ [13].

Для оценки качества измерений организаторы МСИ использовали параметр экспозиции (E<sub>i</sub>), который определяли в соответствии с формулой:

$$E_i = OA \cdot T_{\text{exp}}$$

где T<sub>exp</sub> – время экспонирования в воздухе исследуемого помещения, ч.

Оценку качества результатов измерений проводили в соответствии с требованиями международного стандарта ISO/IEC 17043 по следующим показателям, характеризующим степень смещения экспериментальных значений относительно референсных:

### Процентная разница (PD)

Для оценки лабораторного смещения применяли показатель относительной процентной разницы (PD)<sup>3</sup>, который рассчитывается по формуле:

$$PD[\%] = \frac{E_i - E_{Ri}}{E_{Ri}}$$

где E<sub>Ri</sub> – референсное значение экспозиции;

E<sub>i</sub> – среднее арифметическое значение экспозиции каждого отдельного режима экспонирования:

$$E_i = \sum_{j=1}^n \frac{(E_{\text{net}})_j}{n}$$

где E<sub>net</sub> – значение экспозиции экспериментальных детекторов за вычетом фона, накопленного во время транспортировки детекторов.

REF – показатель

$$REF = \frac{E_i}{E_{Ri}}$$

Результаты считались удовлетворительными по показателю REF, если укладывались в 15% диапазон значений относительно центрального показателя (от 0,85 до 1,15).

<sup>1</sup> Методика измерений «Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом». Разработана ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, ООО «ГК РЭИ». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.2И385 от 16.07.2012 г. [Measurement procedure «Radon. Measurement of radon concentration in indoor air by track method». Methods of certification of VNIIFTRI, certificate № 40090.2И385 from 16.07.2012. (In Russ.)]

<sup>2</sup> Рекомендация МИ 2083-90. ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. С. 1–10. [MI 2083-90 GSI. The measurements are indirect. Determination of measurement results and evaluation of their errors. 1991. P. 1-10. (In Russ.)]

<sup>3</sup> ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации. М.: Стандартинформ, 2014. С. 48. [ISO / IEC 17043-2013 Conformity assessment. General requirements for proficiency testing. Moscow: Standartinform. 2014. P. 48 (In Russ.)]

*Z-индекс*

Оценка приемлемости получаемых результатов описывалась z-индексом<sup>4</sup>. Он определяется как нормированная мера лабораторного смещения и рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_i = \frac{E_i - E_{Ri}}{\sigma_r},$$

где  $\sigma_r$  – стандартное отклонение для оценки квалификации. В настоящих МСИ был установлен как 20% от исходного значения.

При  $Z < 2$  результаты, полученные лабораторией, считались приемлемыми, при  $2 < Z < 3$  значения характеризовались как сомнительные и требовали проверки, при  $Z > 3$  результаты интерпретировались как неприемлемые.

**Результаты МСИ**

ПСИР тестировали в трех режимах экспонирования. Первый режим заключался в длительном экспонировании (154 суток) при низкой ОА  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе помещения (61 Бк/м<sup>3</sup>), расположенного на первом этаже каменного дома в г. Ивреа. Второй режим предполагал такую же длительность экспонирования детекторов (154 суток) при высокой ОА радона (469 Бк/м<sup>3</sup>) в подвальном помещении каменного дома г. Ивреа (см. табл. 2). Третий режим заключался в краткосрочном экспонировании детекторов (9 суток) в помещении с совместным присутствием радона и торона. Особенностью последнего режима являлась высокая влажность, неравномерное

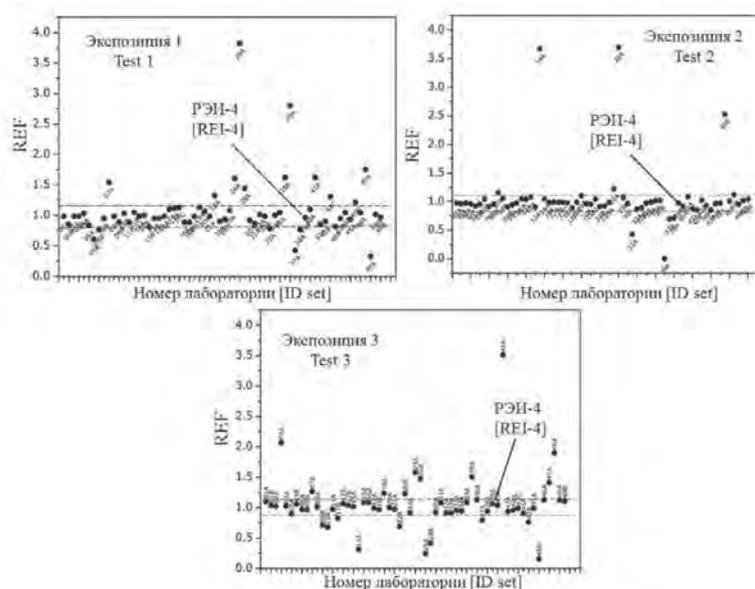
распределение мощности дозы гамма-излучения и повышенное содержание природных радионуклидов в материалах стен ( $^{224}\text{Ra}$  – 369 Бк/кг,  $^{226}\text{Ra}$  – 336 Бк/кг,  $^{40}\text{K}$  – 1670 Бк/кг) (см. табл. 2).

На рисунке 4 представлен разброс измеренных значений ОА радона всеми ПСИР в совокупности относительно референсных значений по показателю REF. Высокий процент выпадающих значений из установленного в данном МСИ интервала приемлемости (0,85–1,15) относится к двум режимам экспонирования: режим 1 (28%) и режим 3 (31%). Наиболее «комфортным» для испытуемых ПСИР оказался режим 2 с увеличенным временем экспонирования в помещении с высоким содержанием радона. В данных условиях результаты, полученные лабораториями, находятся близко к референсным значениям, и доля выпадений составляет всего 12%.

**Оценка воспроизводимости результатов измерений ОА радона трековыми и электретыными экспозиметрами**

Испытуемые ПСИР были представлены двумя типами средств измерений: твердотельными трековыми детекторами (78%) и электретыными детекторами (22%). Оба типа приборов активно применяются в мониторинговых радоновых обследованиях, причем последние наиболее популярны за рубежом.

Оценка качества измерений ОА радона трековыми и электретыными экспозиметрами в целом представлена на рисунке 5 и в таблице 3.



**Рис. 4.** Распределение значений REF-показателя для испытуемых ПСИР в различных режимах экспонирования [12]  
**[Fig. 4.** The distribution REF-values for passive devices in different tests]

<sup>4</sup> ГОСТ Р 50779.60-2017 (ИСО 13528:2015). Статистические методы. Применение при проверке квалификации посредством межлабораторных испытаний. М.: Стандартинформ, 2017. С. 43 [GOST P 50779.60-2017 (ISO 13528:2015). Statistical methods. Use in proficiency testing by interlaboratory comparison. Moscow: Standartinform. 2017. P.43 (In Russ.)]

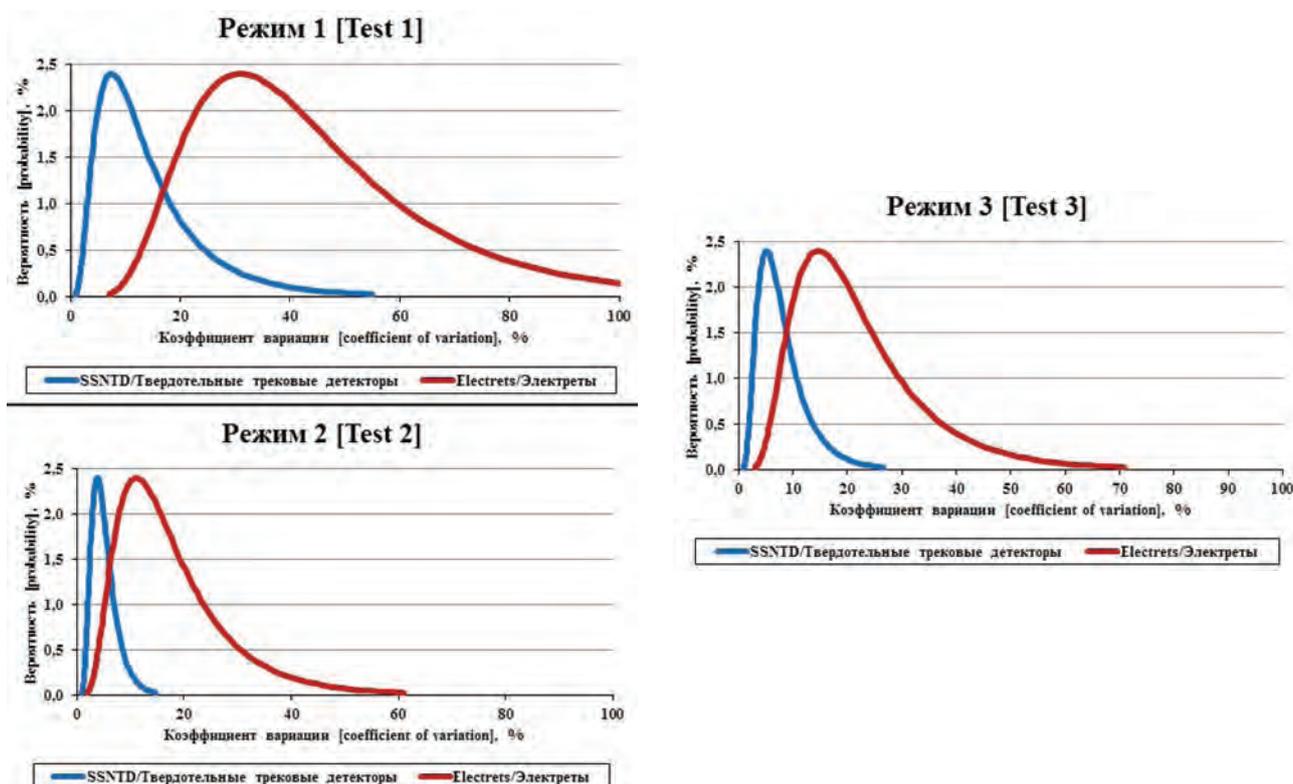


Рис. 5. Распределение коэффициента вариации для электретных и твердотельных трековых детекторов в исследуемых режимах экспозиции

[Fig. 5. Distribution of coefficient variation for Electret and SSNTD in different tests]

Оценка качества измерений радона трековыми и электретными детекторами [13]

Таблица 3

[Table 3]

The evaluation of the quality of the radon measurements by SSNTD and Electret detectors

Критерий качества (приемлемый интервал значений) [Quality criterion (acceptable range of values)]	Режим 1		Режим 2		Режим 3	
	Трековые [SSNTD]	Электреты [Electrets]	Трековые [SSNTD]	Электреты [Electrets]	Трековые [SSNTD]	Электреты [Electrets]
0,85 < REF < 1,15	0,95	1,12	0,95	0,99	0,99	0,93
Z < 2	98	83	98	100	98	67

Анализ распределения коэффициента вариации (КВ) результатов, получаемых трековыми и электретными детекторами, показывает, что электретные детекторы характеризуются более низкой воспроизводимостью результатов [13], причем наибольшая выраженность этих различий наблюдается в режимах 1 (медиана КВ равняется 7 и 28% для трековых и электретных детекторов соответственно) и режиме 3 (медиана КВ равняется 5 и 24% для трековых и электретных детекторов соответственно).

Данные по воспроизводимости испытуемых средств измерений согласуются с оценками приемлемости качества измерений, определяемыми по Z-индексу и показателю REF.

Таким образом, анализ результатов определения экспозиции радона пассивными средствами измерения в реальной воздушной среде эксплуатируемых помещений показывает, что твердотельные трековые детекторы харак-

теризуются в целом лучшими показателями качества измерений по сравнению с электретными (см. рис. 5, табл. 3). Низкое значение Z-индекса (режим 3 согласно таблице 3) свидетельствует, что на воспроизводимость результатов измерений ОА радона с помощью электретных детекторов даже при относительно кратковременном экспонировании существенно влияют повышенные уровни влажности атмосферы и присутствие в ней торона. Результаты проведенных исследований показывают, что наиболее «комфортным» в плане качества получаемых результатов для электретных детекторов оказался режим длительного экспонирования в атмосфере с высокой ОА радона.

**Оценка эффекта фединга пассивных средств измерения радона**

Регистрация ионизирующих излучений с помощью твердотельных детекторов (типичные представите-

ли термолюминесцентные дозиметры и трековые детекторы) основана на том, что ионизирующая частица или квант при попадании в объем детектора производят определенные нарушения его структуры, которые обнаруживаются известными способами. Нарушения могут сохраняться достаточно длительные сроки, однако со временем нарушения начинают постепенно исчезать. Это явление называется фединг. Очевидно, что эффект может приводить к дополнительной погрешности измерения.

В трековой радиометрии эффект фединга заключается в том, что в процессе длительного экспонирования отдельные латентные треки постепенно элиминируются, так что в последующем при считывании треков они не учитываются [8, 14, 15]. Для электретных детекторов данный эффект не характерен, хотя за счет снижения поверхностного заряда пластины в условиях длительного экспонирования может снижаться их чувствительность.

Чувствительность детекторов оценивали в условиях длительного экспонирования в помещениях с разными ОА радона в воздушной среде (режимы 1 и 2). Результаты испытаний, представленные в таблице 4, указывают на отсутствие выраженного эффекта фединга, средние значения экспозиций, определенные твердотельными трековыми детекторами, находятся в пределах погрешности измерения референсного показателя. Наряду с этим,

медианные значения, характеризующиеся более низкими значениями по сравнению с референсными, а также отрицательные значения показателя PD указывают на наличие данного эффекта в твердотельных трековых детекторах, в отличие от электретных детекторов.

В целом, результаты испытаний средств измерений свидетельствуют в пользу того, что в условиях длительного экспонирования (5 месяцев) трековые детекторы позволяют получать надежные результаты измерений ОА радона в воздухе помещений без существенной потери чувствительности.

#### Оценка эффективности детектирования радона в смешанной среде изотопов радона

Испытания ПСИР в режиме 3 (9 суток в подвальном помещении со смешанной атмосферой радона ( $2399 \pm 394$  Бк/м<sup>3</sup>) и торона ( $1685 \pm 389$  Бк/м<sup>3</sup>) были ориентированы на наиболее жесткие условия и предполагали экспонирование детекторов в помещении с неравномерным распределением мощности дозы гамма-излучения, смешанной атмосфере с присутствием обоих изотопов радона и переменными параметрами температуры и влажности. Оценка результатов измерений не выявила влияния торона в воздушной атмосфере на показания трековых экспозиметров (табл. 5).

Таблица 4  
Результаты измерений экспозиции радона трековыми и электретными детекторами в 1 и 2 режимах [13]

[Table 4]

Radon exposure measurements by SSNTD and Electret detectors in tests 1 and 2]

Типы детекторов [Types detectors]	Референсное значение экспозиции, кБк·ч/м <sup>3</sup> [Reference value, kBq·h/m <sup>3</sup> ]	Среднее значение экспозиции, кБк·ч/м <sup>3</sup> [Mean value, kBq·h/m <sup>3</sup> ]	Медианное значение экспозиции, кБк·ч/м <sup>3</sup> [Median value, kBq·h/m <sup>3</sup> ]	Процентная разность PD, % [Percent difference, %]
Режим 1				
Трековые детекторы (все типы) [SSNTD (overall)]		213±34	213	-6
CR-39	225±50	208±31	213	-8
LR-115-2 (РЭИ-4)		218±26	–	-3
Электреты [Electrets]		252±58	261	12
Режим 2				
Трековые детекторы (все типы) [SSNTD (overall)]		1653±215	1680	-5
CR-39	1731± 152	1637±213	1678	-5
LR-115-2 (РЭИ-4)		1685±111	–	-3
Электреты [Electrets]		1725±124	1740	-0,4

Результаты измерений экспозиции радона трековыми и электретыными детекторами в режиме 3

Таблица 5

[Table 5]

Radon exposure measurements by SSNTD and Electret detectors in test 3

Типы детекторов [Types detectors]	Референсное значение экспозиции, кБк·ч/м <sup>3</sup> [Reference value, kBq·h/m <sup>3</sup> ]	Среднее значение экспозиции, кБк·ч/м <sup>3</sup> [Mean value, kBq·h/m <sup>3</sup> ]	Медианное значение экспозиции, кБк·ч/м <sup>3</sup> [Median value, kBq·h/m <sup>3</sup> ]
Трековые детекторы (все типы) [SSNTD (overall)]		591±318	510
CR-39	516 ±85	509±74	501
LR-115-2 (РЭИ-4)		513±79	503
Электреты [Electrets]		482±166	503

Наряду с этим, четко выявляется упомянутый выше факт существенной неоднородности результатов определения радона электретыными детекторами (коэффициент вариации – 24%). Доля испытуемых электретыных детекторов, результаты которых удовлетворяют установленным критериям качества (Z-индекс), составляет всего 67% против 98% для трековых экспозиметров.

Полученные результаты указывают на отсутствие выраженной чувствительности к торону в большинстве тестируемых ПСИР, тогда как особенности климатической среды помещений (высокая влажность, высокая мощность дозы внешнего гамма-излучения) оказывают существенное влияние на воспроизводимость и качество измерений электретыными детекторами.

**Оценка качества измерений радона отечественными трековыми экспозиметрами**

В России для проведения интегральных радоновых измерений применяется трековый метод радиометрии. Отечественные электретыные камеры не приобрели достаточной популярности из-за низкого качества применяемых в электретах материалов и, соответственно, низкой надежности получаемых результатов.

В отличие от зарубежных стран, где наибольшее распространение получили детекторы на основе полиаллилдигликолькарбоната (CR-39), в отечественных трековых экспозиметрах РЭИ-4 в качестве детектора используется пленка на основе нитроцеллюлозы типа Kodak LR-115-2 толщиной около 12 мкм. Диапазон измерений средней ОА радона РЭИ-4 при экспозиции в течение 90 суток составляет от 20 до 2000 Бк/м<sup>3</sup>, чувствительность пленки – (3,5±1,0)·10<sup>2</sup> трек·см<sup>-2</sup>·Бк<sup>-1</sup>·сутки<sup>-1</sup>.

Трековые детекторы РЭИ-4 широко применяются в России для проведения радоновых исследований. Анализ трековых экспозиметров осуществляют с применением комплекта аппаратуры «ТРЕК-РЭИ-1М» на основе электроискрового счета [16, 17]. На рисунке 4 и в таблице 6 представлены результаты качества измерений ОА <sup>222</sup>Rn с использованием отечественных трековых экспозиметров РЭИ-4.

Результаты измерений удовлетворяют установленным критериям качества (см. табл. 6). В условиях длительного экспонирования в атмосфере с низкой ОА радона твердотельные трековые детекторы характеризуются хорошей чувствительностью, эффект фединга незначителен. Конструкция пробоотборной камеры не позволяет прово-

дить детектирование торона. Благодаря этому в условиях экспонирования детекторов в смешанной атмосфере с сопоставимыми высокими концентрациями изотопов радона не выявлен эффект влияния торона на определение содержания радона в воздухе помещений.

Таблица 6

**Результаты определения объемной активности радона трековыми экспозиметрами РЭИ-4 (Россия)**

[Table 6]

**Results determination of concentration radon by passive device REI-4 (Russia)**

Режим экспозиции [Test]	REF (0,85– 1,15)	Z-индекс (σ=20%) [z-score]	ОА радона, Бк/м <sup>3</sup> [Radon concentration, Bq/m <sup>3</sup> ]	Референсное значение, Бк/м <sup>3</sup> [Reference value, Bq/m <sup>3</sup> ]
1	0,96	<2	59±22	61±13
2	1,02	<2	456±190	469±41
3	1,06	<2	2552±1054	2399±394

**Заключение**

Проведение сличительных испытаний пассивных средств измерения ОА радона в естественных условиях эксплуатируемых помещений показало, что наиболее «комфортным» режимом для определения ОА радона в воздухе помещений, характеризующимся максимальной воспроизводимостью результатов, является длительное экспонирование испытуемых средств измерений в помещениях с высокими ОА радона.

Сравнительное исследование трековых и электретыных экспозиметров позволило выявить различия в качестве измерений ОА радона, особенно при длительном экспонировании в атмосфере с низкой ОА радона, а также в помещениях, характеризующихся условиями повышенной влажности, высокой мощности дозы гамма-излучения и смешанной атмосферы изотопов радона.

Результаты проведенных исследований показали отсутствие выраженного эффекта фединга у исследуемых типов детекторов в условиях длительного экспонирования при разной ОА радона в воздушной среде помещений.

Отметим, что по результатам международных сличительных испытаний, на которых были представлены практически все типы трековых экспозиметров радона, используемые в большинстве европейских и американских лабораторий, показано, что экспозиметр типа РЭИ-4

(Россия) относится к группе экспозиметров с наилучшими метрологическими характеристиками. В пользу этого свидетельствует то, что по всем показателям, использованным в МСИ для оценки качества измерений, отличие измеренных экспозиметрами РЭИ-4 значений ОА радона от референсных значений составляет не более 2–6%.

### Литература

1. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-32. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2015. 90 p. ISBN 978-92-0-102514-2.
2. Lecomte J.F., Solomon S., Takala J., et al. Radiological protection against radon exposure // *Annals of the ICRP*. 2014. Vol. 43, No 3. P. 5-6.
3. Steck D. Annual average radon variation over two decades // *Health Physics*. 2009. Vol. 96, No 1. P. 37–47.
4. Miles J.C.H., Howarth C.B., Hunter N. Seasonal variation of radon concentrations in UK homes // *J. Radiol. Prot.* 2012. Vol. 32. P. 275–287.
5. Kotrappa P., Dempsey J.C., Hickey J.R., Stieff L.R. An electrets passive environmental Rn-222 monitor based on ionization measurement // *Health Physics*. 1988. Vol. 54, No 1. P. 47 – 56.
6. Kotrappa P., Dempsey J.C., Ramsey R.W. Stieff L.R. A practical E-PEPM System for Indoor 222Rn Measurement // *Health Physics*. 1990. V. 58, No 4. P. 461 – 467.
7. Николаев В.А. Трековый метод в радоновых измерениях // *АНРИ*. 1998. № 2 (12). С. 16–27.
8. Маренный А.М. Диэлектрические трековые детекторы в радиационно-физическом и радиобиологическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1987. 184 с.
9. GW-893. Results of the 2017 PHE Intercomparison of Passive Radon Detectors // PHE publications. 2019.
10. Jilek K., Hýža M., Kotík L., et al. International intercomparison of measuring instruments for radon/thoron gas and radon short-lived daughter products in the NRPI Prague // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 160, Issue 1-3. P. 154-159.
11. Cardellini F., Chiaberto E., Garlati L., et al. Metrological aspects of international intercomparison of passive radon detectors under field conditions in Marie Curie's tunnel in Lurisia // *Nukleonika*. 2016. 61: issue 3. P. 251-256.
12. The second radon-in-field international intercomparison for passive measurement devices: dwellings and workplaces // *Materials of WORKSHOP*. 21-22.07.2017.
13. Berliera F., Cardellini F., Chiaberto E., et al. Main results of the second AIRP international radon-in-field intercomparison for passive measurement devices // *Radiation measurements*. 2019. No 128. P. 1-11.
14. Caresana M., Ferrarini M., Garlati L., Parravicini A. About ageing and fading of Cr-39 PADC track detectors used as air radon concentration measurement devices // *Radiation Measurements*. 2010. No 45. P. 183–189.
15. Caresana M., Ferrarini M., Garlati L., Parravicini A. Further studies on ageing and fading of CR39 PADC track detectors used as air radon concentration measurement devices // *Radiation Measurements*. 2011. Vol. 46, No 10. P. 1160–1167.
16. Маренный А.М. Измерение объемной активности радона трековым методом // *АНРИ*. 1995. № 3/4. С. 79–84.
17. Маренный А.М. Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом // *АНРИ*. 2012. № 4 (71). С. 13–19.

Поступила: 22.05.2020 г.

**Киселев Сергей Михайлович** – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией регулирующего надзора за объектами ядерного наследия, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Маренный Альберт Михайлович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией природных источников ионизирующих излучений, Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Старинский Виталий Григорьевич** – научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 123098, Москва, ул. Живописная, 46; E-mail: vitalstar90@mail.ru

**Бельских Юрий Сергеевич** – научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Шлыгин Владимир Васильевич** – инженер, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Коренков Игорь Петрович** – доктор биологических наук, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Нефёдов Николай Александрович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Маренный Михаил Альбертович** – кандидат экономических наук, главный инженер, Общество с ограниченной ответственностью «Группа компаний РЭИ», Москва, Россия

**Для цитирования:** Киселев С.М., Маренный А.М., Старинский В.Г., Бельских Ю.С., Шлыгин В.В., Коренков И.П., Нефёдов Н.А., Маренный М.А. Оценка качества измерений объемной активности радона в воздухе помещений. Результаты международных сравнительных испытаний // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 4. С. 82-92. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-82-92

## Quality assessment of indoor radon measurements. Results of the international radon in-field intercomparison study

Sergey M. Kiselev<sup>1</sup>, Albert M. Marennyy<sup>2</sup>, Vitaliy G. Starinskiy<sup>1</sup>, Yuriy S. Belskikh<sup>1</sup>, Vladimir V. Shlygin<sup>1</sup>, Igor P. Korenkov<sup>1</sup>, Nikolay A. Nefedov<sup>2</sup>, Mikhail A. Marennyy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Federal medical biophysical center after A.I. Burnazyan of Federal medico-biological Agency of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Scientific-technical center of the radiation-chemical safety and hygiene of Federal Medical-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Limited liability company "Group REI", Moscow, Russia

*The article presents the results of the international radon in-field intercomparison study for passive radon measurement devices. The tests were organized by the environmental agency of the administrative region of Piemonte (Ivrea, Italy). Coverage of participants was 49 laboratories from 15 countries (Italy, Hungary, France, Great Britain, Lithuania, Russia, Sweden, Spain, Bulgaria, Argentina, Australia, Finland, Ireland, Greece and Slovenia). The certified radon passive devices included SSNTDs and electret detectors. SSNTDs are mostly represented by PADC plastic (CR-39) and nitrocellulose film (LR-115-2) detectors. Radon measuring devices were tested in long-term exposure modes at low and high radon levels (tests 1 and 2) and short-term exposure mode at the simultaneous presence of radon and thoron in the atmosphere (test 3). The intercomparison study was carried out in real conditions of operated buildings with different climatic conditions. The main purpose of this study was to evaluate the quality (accuracy and reliability) of the radon measurements under situations similar to the ones in which devices are normally exposed. In comparison with electrets, solid-state track detectors showed to have generally better reproducibility. For the electrets, the most «comfortable» radon measurement conditions were prolonged exposure at high radon levels. There was no significant fading effect of SSNTD at long-term exposure observed. The paper presents the results of the quality assessment of REI-4 passive device based on LR-115-2 widely used for radon monitoring studies in the Russian Federation.*

**Key words:** radon, REI-4, in-field intercomparison study, SSNTD, electrets, LR-115-2, CR-39.

### References

1. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-32. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2015, 90 p. ISBN 978-92-0-102514-2.
2. Lecomte JF, Solomon S, Takala J, Jung T, Strand P, Muriith C, et al. Radiological protection against radon exposure. *Annals of the ICRP*. 2014;43(3): 5-6.
3. Steck D. Annual average radon variation over two decades. *Health Physics*. 2009;96(1): 37-47.
4. Miles JCH, Howarth CB, Hunter N. Seasonal variation of radon concentrations in UK homes. *Journal of Radiological Protection*. 2012;32: 275-287.
5. Kotrappa P, Dempsey JC, Hickey JR, Stieff LR. An electrets passive environmental Rn-222 monitor based on ionization measurement. *Health Physics*. 1988;54(1): 47 - 56.
6. Kotrappa P, Dempsey JC, Ramsey RW, Stieff LR. A practical E-PEPM System for Indoor 222Rn Measurement. *Health Physics*. 1990;58(4): 461 - 467.
7. Nikolaev AV. Track method in radon measurements. *ANRI=ANRI*. 1998;2: 16-27. (In Russian)
8. Marennyy MA. Dielectric track detectors in a radiation-physical and radio-biological experiment. Moscow: Energoatomizdat. 1987. 184 p. (In Russian)
9. GW-893. Results of the 2017 PHE Intercomparison of Passive Radon Detectors. *PHE publications*. 2019.
10. Jilek K, Hýža M, Kotík L, Thomas J, Tomášek L. International intercomparison of measuring instruments for radon/thoron gas and radon short-lived daughter products in the NRPI Prague. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014;160(1-3): 154-159.
11. Cardellini F, Chiaberto E, Garlati L, Giuffrida D, Leonardi F, Magnoni M, et al. Metrological aspects of international intercomparison of passive radon detectors under field conditions in Marie Curie's tunnel in Lurisia. *Nukleonika*. 2016;61(3): 251-256.
12. The second radon-in-field international intercomparison for passive measurement devices: dwellings and workplaces. *Materials of WORKSHOP*. 21-22.07.2017.
13. Berliera F, Cardellini F, Chiaberto E, Garlati L, Giuffrida D, Ragani MF, et al. Main results of the second AIRP international radon-in-field intercomparison for passive measurement devices. *Radiation measurements*. 2019;128: 1-11.
14. Caresana M, Ferrarini M, Garlati L, Parravicini A. About ageing and fading of Cr-39 PADC track detectors used as air radon concentration measurement devices. *Radiation Measurements*. 2010;45: 183-189.
15. Caresana M, Ferrarini M, Garlati L, Parravicini A. Further studies on ageing and fading of CR39 PADC track detectors used as air radon concentration measurement devices. *Radiation Measurements*. 2011;46(10): 1160-1167.
16. Marennyy AM. Radon concentration measurement by track method. *ANRI=ANRI*. 1995; 3/4:79-84. (In Russian)
17. Marennyy AM. Methodological aspects of measuring the average concentration of radon in rooms by the track method. *ANRI=ANRI*. 2012;4: 13-19. (In Russian)

Received: May 22, 2020

### Vitaliy G. Starinskiy

Federal medical biophysical center after A.I. Burnazyan

**Address for correspondence:** Zhivopisnaya ul., 46, Moscow, 123098, Russia; E-mail: vitalstar90@mail.ru

**Sergey M. Kiselev** – Ph.D. in biol., Head of laboratory on regulatory supervisor of nuclear legacy sites, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

**Albert M. Marennyy** – Ph.D. in phys. and math., Chief of laboratory on natural radiation sources, Scientific-technical center of the radiation-chemical safety and hygiene of Federal Medico-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

**For correspondence: Vitaliy G. Starinskiy** – researcher, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia (Zhivopishnaya ul., 46, Moscow, 123098, Russia; E-mail: vitalstar90@mail.ru)

**Yuriy S. Belskikh** – researcher, State Research Center – Burnasyan, Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

**Vladimir V. Shlygin** – junior researcher State Research Center – Burnasyan, Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

**Igor P. Korenkov** – Doctor of biol., Ph.D. in technical sciences, major researcher State Research Center – Burnasyan, Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

**Nikolay A. Nefedov** – Ph.D. in math, leading researcher, Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical and Hygiene of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

**Mikhail A. Marennyy** – Ph.D., chief engineer, Limited liability company “Group REI”, Moscow, Russia

**For citation: Kiselev S.M., Marennyy A.M., Starinskiy V.G., Belskikh Y.S., Shlygin V.V., Korenkov I.P., Nefedov N.A., Marennyy M.A. Quality assessment of indoor radon measurements. Results of the International radon in-field intercomparison study. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 4. P. 82-92. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-82-92**

## Градуировка сцинтилляционного спектрометра гамма-излучений с применением метода математического моделирования

Д.В. Арефьева<sup>1</sup>, В.Б. Фирсанов<sup>1</sup>, Д.Д. Куруч<sup>1</sup>, Р.Е. Брюхов<sup>2</sup>, В.А. Тарита<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-технический центр «РАДЭК», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Санкт-Петербург, Россия

*В статье описан метод градуировки спектрометра гамма-излучений с применением программы имитационного трехмерного моделирования процессов переноса и регистрации ионизирующих излучений. Метод на примере градуировки, проведенной на счетном образце в виде плоского источника (фильтр АФА-РМП20), предоставляет возможность определения активности с применением спектрометрического оборудования на основе неорганических сцинтилляционных кристаллов. Предложен способ параметрической оценки идентичности расчетного и экспериментального спектра на основе критерия согласия Пирсона. Проведены сличительные испытания. Представлены результаты апробации предложенного метода, показывающие, что различие результатов измерений активности исследуемых образцов радионуклидов на основе полученной градуировки по сравнению с результатами измерений активности, выполненных с помощью калиброванного спектрометра на базе полупроводникового детектора, не превышает 20%.*

**Ключевые слова:** спектрометр гамма-излучений, математическое моделирование, аналитический фильтр, активность радионуклида.

### Введение

Работа с открытыми источниками ионизирующих излучений (ИИИ) представляет собой особый вид радиационно опасных работ и связана с рисками поступления радионуклидов в организм человека. Система обеспечения радиационной безопасности в ходе проведения таких работ включает в себя организационные и технические мероприятия, направленные на получение достоверных сведений о контролируемых уровнях вредного и (или) опасного производственного фактора радиационной природы с целью подтверждения соблюдения требований нормативных документов. Также, согласно Методическим указаниям МУ 2.6.1.065-2014 «Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования», одним из методов контроля профессионального внутреннего облучения является дозиметрический контроль рабочих мест, важную роль при осуществлении которого играет определение радионуклидного состава и активность каждого радионуклида в образцах, таких как пробы воздуха и снимаемого радиоактивного загрязнения поверхностей.

Определение активности в образце конкретного гамма-излучающего радионуклида в настоящее время проводится с применением спектрометров с полупроводниковыми и сцинтилляционными детекторами. Существующее оборудование на основе полупроводниковых детекторов (ППД) имеет хорошую эффективность регистрации и разрешающую способность, но отличается высокой стоимостью и сложным техническим обслуживанием. При проведении рутинных инструментальных исследований с заранее известным нуклидным составом образцов нет необходимости использовать такое сложное и дорогостоящее оборудование. Данная задача может быть решена путем использования менее дорогостоящего спектрометрического оборудования на основе неорганических сцинтилляционных кристаллов при оптимальном сочетании как приборных методов градуировки спектрометра, так и методов математического моделирования с применением метода Монте-Карло, его основных спектрометрических характеристик. Под градуировкой спектрометра гамма-излучений подразумевают получение зависимости эффективности регистрации гамма-излучения в пике полного поглощения (ППП), при условии 100% выхода гамма-квантов на распад, от энергии излучения.

**Арефьева Дарья Владимировна**

Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины

**Адрес для переписки:** 196143, Санкт-Петербург, проспект Юрия Гагарина, д. 65; E-mail: niipmm.210@gmail.com

Применение метода Монте-Карло для градуировки сцинтилляционных спектрометров неоднократно использовалось в исследованиях многих как отечественных, так и зарубежных ученых. Так, например, в работе [1] проведено моделирование методом Монте-Карло системы двух детекторов NaI(Tl) с использованием программного обеспечения MCNP (Monte-Carlo N-Particle Transport) версии 4C. Полученное соотношение между значениями эффективности регистрации гамма-излучения, полученных методом Монте-Карло, и экспериментальными значениями эффективности показало, что программа MCNP4C может быть успешно использована для моделирования функций отклика этих двух сцинтилляционных детекторов NaI(Tl). В работе [2] проводилась оптимизация метрологических параметров спектрометра излучений человека СКГ-АТ1316А путем математического моделирования методом Монте-Карло процесса переноса гамма-излучения с использованием программного обеспечения MCNP версии 4В в геометриях измерения спектрометра и расчета аппаратных спектров в заданных геометриях измерения для фантома легких взрослого человека с различными инкорпорированными радионуклидами.

Авторами данной статьи в своем исследовании предлагается способ сравнения экспериментальных и смоделированных спектров с помощью критерия  $\chi^2$ , в котором спектры сравниваются не только в пиках полного поглощения, но и в областях комптоновского рассеивания, и в области многократного рассеяния.

В настоящее время существует несколько программных продуктов, позволяющих моделировать системы переноса излучения с помощью метода Монте-Карло, их сравнительная характеристика приведена во многих научных публикациях [3–6]. Авторами в своих исследованиях использовалось программное обеспечение MСС 3D (Monte-Carlo Calculations 3D) [7]. MСС 3D – программа имитационного трехмерного моделирования процессов переноса и регистрации ионизирующих излучений. Эта программа позволяет решать задачи по расчету функции отклика детектора исключительно на базе развитого графического интерфейса (без использования программирования на алгоритмических языках). В частности, в ней реализована возможность создавать подробную сложную геометрическую модель разрабатываемого устройства детектирования, проводить расчеты и получать результаты расчетов в необходимой форме.

**Цель исследования** – разработка метода градуировки спектрометра гамма-излучений с применением программы имитационного трехмерного моделирования процессов переноса и регистрации ионизирующих излучений.

### Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- разработка имитационной модели измерительного комплекса, включающей модель спектрометра гамма-излучений и модель позиционирующего устройства с моделью аналитического фильтра;

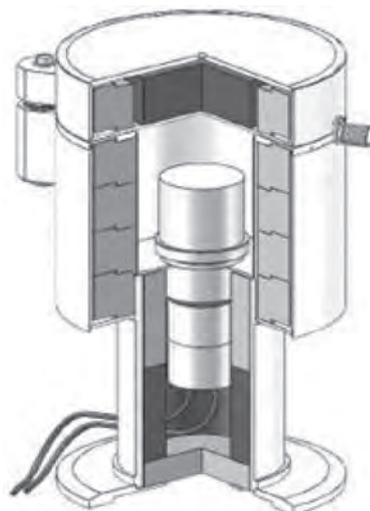
- оценка идентичности экспериментальных и смоделированных спектров;

- расчет зависимости эффективности регистрации от энергии гамма-излучения с использованием смоделированных аппаратных спектров единичной активности.

### Материалы и методы

Градуировку спектрометра гамма-излучений осуществляли с применением программы MСС 3D, позволяющей проводить симуляцию прохождения излучения через вещество методом Монте-Карло. Моделирование аппаратного спектра выполняли с применением программы для визуализации и обработки расчетных спектров MСА (MultiChannel Analyzer), входящей в пакет MСС 3D.

Объектом исследования являлся спектрометр гамма-излучений МКГБ-01 «РАДЭК» (Россия). Спектрометр состоит из одного блока детектирования на основе сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) с диаметром 80 мм и высотой 80 мм, а также низкофоновой защитной камеры (рис. 1). Экспериментальные исследования проводили с набором объемных источников специального назначения с радионуклидами  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , равномерно нанесенными на рабочую поверхность аналитических фильтров АФА-РСП-20. С радионуклидами  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  были проведены серии из 6 измерений.



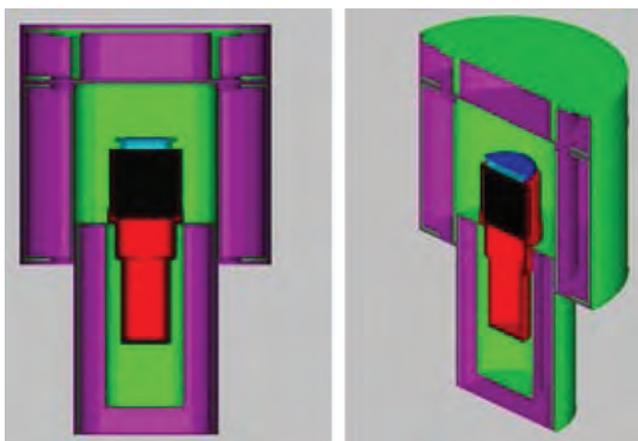
**Рис. 1.** Схематическое изображение спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» в разрезе

[Fig. 1. The sectional view of the spectrometer MKGB-01 «RADEK»]

### Результаты и обсуждение

Для математического моделирования процесса измерения гамма-излучающих радионуклидов в образце (фильтре) с применением программного обеспечения MСС 3D<sup>1</sup> разработана имитационная модель измерительного комплекса, включающая модель спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» (Россия) – камера фоновой защиты с блоком детектирования, а также модель позиционирующего устройства с имитатором аналитического фильтра (рис. 2). Модель сцин-

<sup>1</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615088 «Программа для имитационного трехмерного моделирования систем детектирования и регистрации ионизирующих излучений MСС 3D», 2008. [Certificate of state registration of a computer program No. 2008615088 «Program for simulation of three-dimensional modeling of systems for the detection and registration of ionizing radiation MСС 3D». 2008. (In Russ.)]

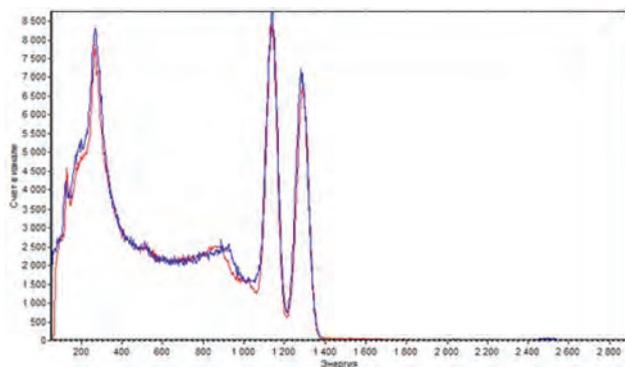


**Рис. 2.** Имитационная модель измерительного комплекса (низкофоновая защита – сиреневый, кристалл – черный, корпус детектора – красный, позиционирующее устройство с фильтром – голубой)

[Fig. 2. The simulation model of a measuring complex (low-background shield – lilac, crystal – black, detection block – red, positioning device with a filter – blue)]

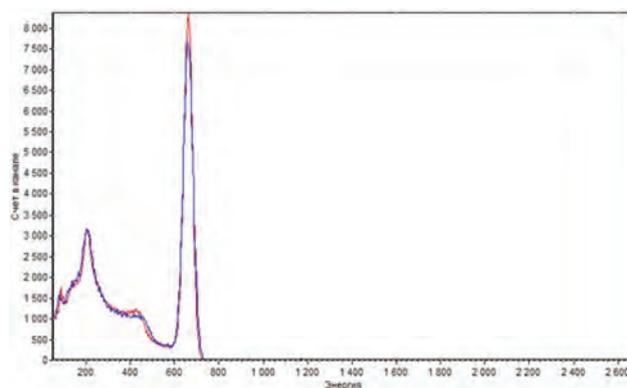
тилляционного блока детектирования на основе кристалла NaI(Tl) смоделирована с учетом спектрометрических параметров и геометрических размеров составляющих частей на основании Технических условий<sup>2</sup>.

В результате моделирования процесса переноса гамма-излучения в геометрии измерения спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» (Россия) и фильтра совместно с позиционирующим устройством с учетом энергетической цены деления канала и энергетического разрешения получены функции отклика спектрометра в виде аппаратурных спектров. Так как процесс моделирования является статистическим, было смоделировано по 6 аппаратурных спектров радионуклидов <sup>60</sup>Со и <sup>137</sup>Сs. На рисунках 3, 4 представлены один из экспериментальных спектров и один из смоделированных спектров, приведенные к единице времени и единице активности этих радионуклидов.



**Рис. 3.** Экспериментальный за вычетом фона (красный) и смоделированный (синий) спектры гамма-излучения радионуклида <sup>60</sup>Со

[Fig. 3. The experimental (red) and simulated (blue) gamma-ray spectra of the radionuclide <sup>60</sup>Со with the subtracted background]



**Рис. 4.** Экспериментальный за вычетом фона (красный) и смоделированный (синий) спектры гамма-излучения радионуклида <sup>137</sup>Сs

[Fig. 4. The experimental (red) and simulated (blue) gamma-ray spectra of the radionuclide <sup>137</sup>Сs with the subtracted background]

Сравнение измеренных и смоделированных спектров проводили в следующих энергетических интервалах:

- интервал, соответствующий ППП для гамма-линий энергии 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ для радионуклида <sup>60</sup>Со и ППП для гамма-линии энергии 661,7 кэВ для радионуклида <sup>137</sup>Сs;

- интервалы, отвечающие комптоновскому рассеянию в диапазоне углов 30-60°, 60-90° и 90-180° (для радионуклида <sup>60</sup>Со рассматривалась средняя энергия гамма-излучения, равная 1252,9 кэВ);

- интервал, соответствующий многократному рассеянию с энергией выше 100 кэВ.

С этой целью для каждого *i*-го измерения (спектра) для каждого выбранного интервала рассчитывали отношение  $K_{spi}$  скоростей счета от экспериментальных спектров за вычетом фона и смоделированных спектров для каждого радионуклида по формуле:

$$K_{spi} = \frac{n_{i\gamma} - \bar{n}_\phi}{n_{im}} \cdot \frac{A_m}{A_\gamma}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где  $m = 12$  – число измерений (спектров),

$A_\gamma$  – активность радионуклида, расп./с (Бк),

$A_m = 1 \cdot 10^7$  – число реализуемых событий при моделировании, расп./с,

$n_{i\gamma}, n_{im}$  – скорости счета от экспериментального и смоделированного спектра соответственно, имп/с,

$\bar{n}_\phi$  – средняя, по результатам пяти измерений, скорость счета фона, имп/с.

По формуле (2) рассчитывали среднее значение  $\bar{K}_{sp}$ :

$$\bar{K}_{sp} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K_{spi}, \quad (2)$$

В таблице 1 приведены результаты сравнения экспериментальных и смоделированных спектров в каждом энергетическом интервале.

Результаты расчета коэффициентов  $K_{spi}$  и  $\bar{K}_{sp}$ , представленные в таблице 1, показывают, что различие спек-

<sup>2</sup> ТУ 2651-001-26083472-2015. Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные на основе кристаллов натрия йодистого, активированного таллием. Усолье-Сибирское: ОАО «Кристалл», 2015. 10 с. [ТУ 2651-001-26083472-2015. Scintillation ionizing radiation detectors based on thallium activated sodium iodide crystals. Usolye-Sibirskoe: OJSC «Crystal»; 2015: 10. (In Russ.)]

Сравнение экспериментальных и смоделированных спектров радионуклидов <sup>60</sup>Со и <sup>137</sup>Сs

Таблица 1

[Table 1

The comparison of the experimental and simulated spectra of <sup>60</sup>Со and <sup>137</sup>Сs radionuclides]

Номер измерения [Measurement number]	Значение коэффициента $K_{rpi}$ в энергетическом интервале, отн. ед. [The value of the coefficient $K_{rpi}$ in the energy intervals, rel. units]				
	пик полного поглощения [total absorption peak]	30–60°	60–90°	90–180°	многократное рассеяние [multiply scattering]
<sup>60</sup> Со					
1	0,924	1,009	0,998	0,938	0,919
2	0,927	1,014	0,990	0,936	0,911
3	0,923	1,012	0,998	0,941	0,912
4	0,929	1,010	0,995	0,945	0,920
5	0,930	1,018	0,990	0,943	0,922
6	0,930	1,014	0,995	0,945	0,922
<sup>137</sup> Сs					
7	1,004	0,947	1,046	0,990	0,945
8	1,001	0,960	1,055	0,981	0,933
9	1,001	0,965	1,050	0,981	0,936
10	1,002	0,952	1,050	0,983	0,940
11	1,004	0,950	1,048	0,986	0,940
12	1,002	0,963	1,052	0,986	0,945
$\overline{K_{sp}}$ , отн. ед. [ $\overline{K_{sp}}$ , rel. units]	0,965	0,985	1,022	0,963	0,929

тров не превышает 9%. Это обстоятельство указывает на возможность идентичности спектров. Проверку этого предположения проводили для каждого энергетического интервала, используя критерий согласия Пирсона  $\chi^2$  [8], по формулам:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(G - K_{spi})^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\overline{K_{sp}}}{100} \sqrt{S^2(\overline{K_{sp}}) + S^2(A)} \quad (4)$$

$$S(\overline{K_{sp}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (K_{spi} - \overline{K_{sp}})^2}{m-1}} \quad (5)$$

где  $S(\overline{K_{sp}})$  – среднее квадратичное отклонение результата расчета коэффициента  $\overline{K_{sp}}$ ,

$S(A) = 6\%$  – погрешность аттестации активности (P=0,95) радионуклидов <sup>60</sup>Со и <sup>137</sup>Сs в объемном источнике специального назначения,

$G$  – гипотетическое значение  $\overline{K_{sp}}$ , предполагаемое равным 1,00.

Результаты расчета значений коэффициента  $\chi^2$  для каждого энергетического интервала представлены в таблице 2.

Результаты расчета коэффициента  $\chi^2$  в выбранных энергетических интервалах

Таблица 2

[Table 2

The results of the coefficient  $\chi^2$  calculations in the selected energy intervals]

Энергетический интервал [Energy interval]	Значение коэффициента $\chi^2$ в энергетическом интервале, отн. ед. [The value of the coefficient $\chi^2$ in the energy interval, rel. units]
Пик полного поглощения [Total absorption peak]	6,67
30–60°	2,94
60–90°	3,31
90–180°	5,82
Многократное рассеяние [Multiply scattering]	19,34

По таблице критических значений распределения  $\chi^2$  [8] определено, что для числа степеней свободы  $\nu = 2m - 1$  и уровня значимости 0,05 критическое значение составляет 35,2. Из данных таблицы 2 следует, что максимальное значение  $\chi^2$  составляет 19,34 для энергетического интервала, отвечающего многократному рассеянию, что говорит о приемлемости гипотезы об идентичности экспериментальных и смоделированных спектров.

Значения коэффициентов Стьюдента определяли по таблице [8] при числе степеней свободы  $\nu$ . Ошибку ( $\Delta G$ ) величины  $G$  рассчитывали по формулам:

$$\Delta G = t \cdot \varepsilon \quad (6)$$

где  $t=1,714$  – значение коэффициента Стьюдента для вероятности 0,90.

$$\varepsilon = \sqrt{S^2(\overline{K_{cp}}) + S^2(A)} \quad (7)$$

где  $S^2(\overline{K_{cp}})$ ,  $S^2(A)$  – см. формулу (4).

Результаты расчетов величины  $\Delta G$  для каждого выбранного энергетического интервала представлены в таблице 3.

Таким образом, смоделированный спектр гамма-излучения идентичен экспериментальному в пределах 12,5% при вероятности  $P = 0,90$ .

Для примера на рисунках 5, 6 представлены экспериментальные и смоделированные спектры радионуклидов  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ , приведенные к единице времени и единице активности. Отклонения спектров в энергетическом интервале 50–2000 кэВ для радионуклида  $^{152}\text{Eu}$  и в пике полного поглощения для радионуклида  $^{241}\text{Am}$  составляют

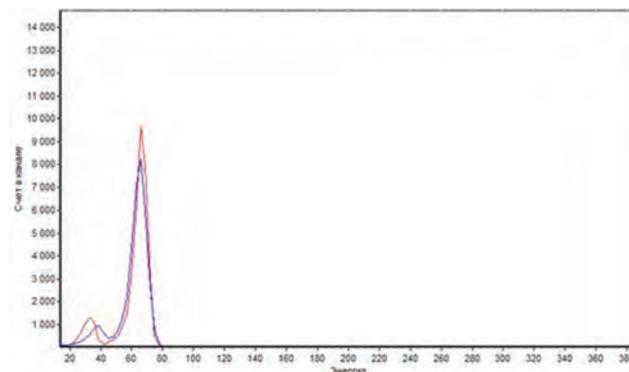


Рис. 6. Экспериментальный за вычетом фона (красный) и смоделированный (синий) спектры гамма-излучения радионуклида  $^{241}\text{Am}$

[Fig. 6. The experimental (red) and simulated (blue) gamma-ray spectra of the radionuclide  $^{241}\text{Am}$  with the subtracted background]

11% и 2,5% соответственно, что также подтверждает гипотезу идентичности экспериментальных и смоделированных спектров.

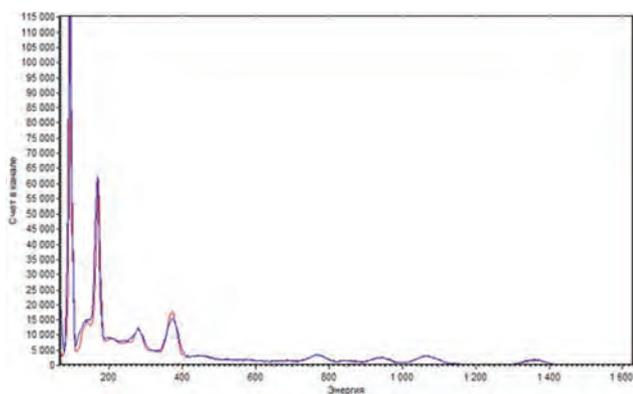


Рис. 5. Экспериментальный за вычетом фона (красный) и смоделированный (синий) спектры гамма-излучения радионуклида  $^{152}\text{Eu}$

[Fig. 5. The experimental (red) and simulated (blue) gamma-ray spectra of the radionuclide  $^{152}\text{Eu}$  with the subtracted background]

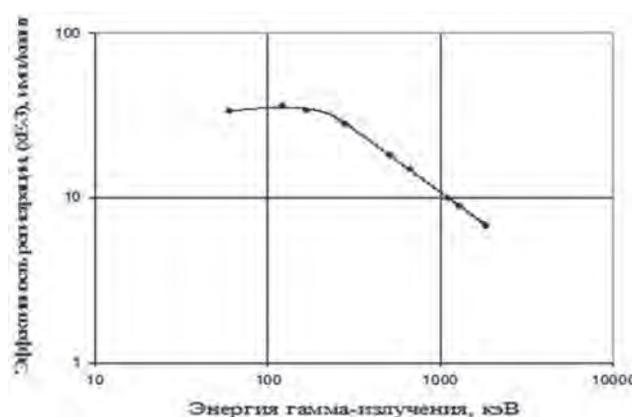


Рис. 7. Зависимость эффективности регистрации для геометрии измерения «фильтр» от энергии гамма-излучения [Fig. 7. The dependence of the registration efficiency for the geometry of the measurement «filter» on the energy of gamma radiation]

Результаты расчета величины  $\Delta G$  в выбранных энергетических интервалах

Таблица 3

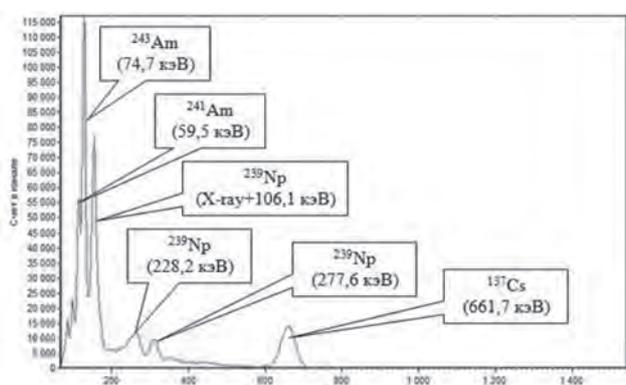
[Table 3

The results of the  $\Delta G$  calculations in the selected energy intervals]

Параметр [Parameter]	Энергетический интервал [Energy interval]				
	пик полного поглощения [total absorption peak]	30–60°	60–90°	90–180°	многократное рассеяние [multiply scattering]
$\varepsilon, \%$	7,2	6,7	6,7	6,4	6,1
$G, \%$	12,3	11,5	11,5	11,0	10,5

С использованием смоделированных спектров рассчитаны значения эффективности регистрации в энергетическом интервале 50–2000 кэВ (рис. 7).

В качестве примера была рассчитана активность маз-ка, взятого на фильтр с рабочего места сотрудника научно-исследовательского института, работающего с открытыми источниками ионизирующих излучений. Данный образец был измерен на полупроводниковом спектрометре МКГБ-01 «РАДЭК» и исследуемом сцинтилляционном спектрометре МКГБ-01 «РАДЭК». В образце были обнаружены следующие радионуклиды:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{239}\text{Np}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (рис. 8). На рисунке 9 показаны спектры, полученные при последовательном вычитании из исследуемого спектра от образца сначала смоделированного спектра радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , затем смоделированного спектра радионуклида  $^{239}\text{Np}$  и смоделированного спектра радионуклида  $^{243}\text{Am}$ .



**Рис. 8.** Спектр от образца, измеренный на спектрометре гамма-излучений МКГБ-01 «РАДЭК»  
**[Fig. 8.** The spectrum of the sample measured on a gamma-ray spectrometer MKGB-01 «RADEK»]

Результаты расчета активности этих радионуклидов в образце приведены в таблице 4.

Таблица 4

**Сравнение результатов расчета активности в исследуемом образце**

[Table 4

**The comparison of the calculated activity in the test sample]**

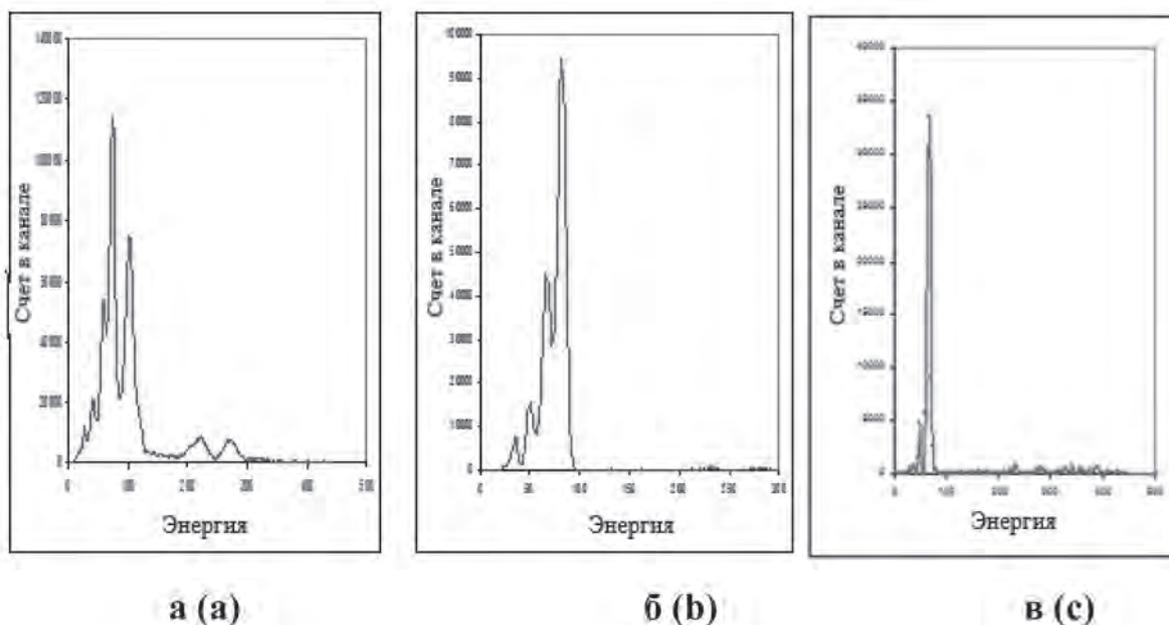
Радионуклид [Radionuclide]	Активность, Бк [Activity, Bq]		Отклонение, % [Deviation, %]
	МКГБ-01 «РАДЭК» ППД [MKGB-01 «RADEK» HPGe]	МКГБ-01 «РАДЭК» NaI(Tl) [MKGB-01 «RADEK» NaI(Tl)]	
$^{241}\text{Am}$	170	138	-18,8
$^{243}\text{Am}$	278	243	-12,6
$^{239}\text{Np}$	286	290	+1,4
$^{137}\text{Cs}$	369	340	-7,9

Согласно представленным в таблице 4 данным, расхождение в результатах расчета активности в образце не превышает 20%, что говорит о возможности применения метода градуировки спектрометра гамма-излучений с использованием программы имитационного трехмерного моделирования процессов переноса и регистрации ионизирующих излучений для обработки измеренных спектров на сцинтилляционном спектрометре.

**Заключение**

Полученные в настоящей работе результаты дают основание сделать следующие выводы:

1. Разработанная имитационная модель измерительного комплекса, включающая гамма-спектрометр МКГБ-01 «РАДЭК» и позиционирующее устройство с аналитическим



**Рис. 9.** Спектры от образца после вычитания смоделированных спектров (а – после вычитания  $^{137}\text{Cs}$ , б – после вычитания  $^{239}\text{Np}$ , в – после вычитания  $^{243}\text{Am}$ )  
**[Fig. 9.** The spectra from the sample after subtracting the simulated spectra (a – after subtracting  $^{137}\text{Cs}$ , б – after subtracting  $^{239}\text{Np}$ , в – after subtracting  $^{243}\text{Am}$ )]

фильтром, позволяет моделировать аппаратные спектры гамма-излучения в энергетическом интервале от 50 до 2000 кэВ с погрешностью, не превышающей 12,5%, полученной путем сравнения экспериментальных и смоделированных спектров с применением критерия согласия Пирсона  $\chi^2$ .

2. Апробация предложенного метода градуировки сцинтилляционного спектрометра с применением математического моделирования показала, что различия результатов расчета активности исследуемых образцов радионуклидов на основе смоделированных аппаратных спектров не превышают 20% по сравнению с результатами измерений активности, выполненных с помощью спектрометра на базе полупроводникового детектора.

3. Предложенный метод может быть использован для градуировки спектрометров со сцинтилляционными блоками детектирования различных модификаций для различных геометрий измерения.

4. Обработка результатов измерений активности исследуемых образцов с применением рассмотренного в работе метода не применима в том случае, когда предполагается наличие в исследуемом образце неизвестного сложного радионуклидного состава (идентификация радионуклидов в данном случае возможна только с применением гамма-спектрометра с полупроводниковым детектором).

#### Литература

1. Mouhti I., Elanique A., Messous M.Y. Monte Carlo modelling of a NaI(Tl) scintillator detectors using MCNP simulation code // J. Mater. Environ. Sci. 2017. Vol. 8, Issue 12. P. 4560-4565.

2. Жуковский А.И., Коновалов Е.А., Гузов В.Д., и др. Спектрометр для измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в легких взрослого человека. Часть 1. Результаты экспериментальных и теоретических исследований // Приборы и методы измерений. 2013. № 1 (6). С. 29-35.
3. Lépy M.-C., Altitzoglou T., Anagnostakis M.J. Intercomparison of methods for coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry // App. Rad. and Is. 2012. Vol. 70. P. 2112-2118.
4. Vidmar T., Caponi M., Hult M. Equivalence of computer codes for calculation of coincidence summing correction factors // App. Rad. and Is. 2014. Vol. 87. P. 336-341.
5. Приц В.В. Оценка влияния параметров проведения рентгенографического исследования на различные дозовые характеристики с помощью программного обеспечения МСС-3D [Текст]: магистр. диссерт. СПб. 2015. 81 с.
6. Tekin H.O. MCNP-X Monte Carlo Code Application for Mass Attenuation Coefficients of Concrete at Different Energies by Modeling 3 x 3 Inch NaI(Tl) Detector and Comparison with XCOM and Monte Carlo Data // Science and Technology of Nuclear Installations. 2016. Vol. 7, No 31. P. 1-7.
7. Багаев К.А., Козловский С.С., Новиков И.Э. Программа для имитационного трехмерного моделирования систем детектирования и регистрации ионизирующих излучений на базе развитого графического интерфейса // АНПИ. 2007. Т. 4. С. 35 – 40.
8. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

Поступила: 26.05.2020 г.

**Арефьева Дарья Владимировна** – и.о. заведующего лабораторией № 1, Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 196143, Санкт-Петербург, проспект Юрия Гагарина, д. 65; E-mail: niipmm.210@gmail.com

**Фирсанов Владимир Борисович** – инженер-исследователь лаборатории № 1, Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия

**Куруч Дмитрий Дмитриевич** – кандидат химических наук, инженер-исследователь лаборатории № 1, Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия

**Брюхов Роман Евгеньевич** – начальник технического отдела, Научно-технический центр «РАДЭК», Санкт-Петербург, Россия

**Тарита Вольдемар Андреевич** – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий – ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектрометрии излучений человека, Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Санкт-Петербург, Россия

**Для цитирования:** Арефьева Д.В., Фирсанов В.Б., Куруч Д.Д., Брюхов Р.Е., Тарита В.А. Градуировка сцинтилляционного спектрометра гамма-излучений с применением метода математического моделирования // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. – С. 93-100. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-93-100

## Gamma scintillation spectrometer calibration using the method of mathematical modeling

Darya V. Arefyeva<sup>1</sup>, Vladimir B. Firsanov<sup>1</sup>, Dmitriy D. Kuruch<sup>1</sup>, Roman E. Bryukhov<sup>2</sup>, Voldemar A. Tarita<sup>3</sup><sup>1</sup> Research Institute of Industrial and Maritime Medicine of the Federal Medical Biological Agency, Saint Petersburg, Russia<sup>2</sup> Scientific Technical Centre «RADEK», Saint Petersburg, Russia<sup>3</sup> Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia

*The article describes a method for calibrating a gamma ray spectrometer using a three-dimensional simulation program for the transfer and registration of ionizing radiation. In the example of calibration of plane source counters (filter AFA-RMP20), this method allows one to determine the activity by using spectrometric equipment based on inorganic scintillation crystals. We proposed a method for parametric estimation of the identity of the calculated and experimental spectrum based on the Pearson agreement criterion. We then performed interlaboratory comparisons. The results demonstrate that the difference between measured values of the activity in the test samples of radionuclides using obtained calibration and values measured with a semiconductor based calibrated spectrometer do not exceed 20%.*

**Key words:** gamma-ray spectrometer, mathematical modeling, analytical filter, radionuclide activity

## References

1. Mouhti I, Elanique A, Messous MY. Monte Carlo modelling of a NaI(Tl) scintillator detectors using MCNP simulation code. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2017;8(12): 4560-4565.
2. Zhukousky A, Kononov E, Guzov V, Kozhemiakin V, Khrutchinsky A, Kutsen S, et al. Spektrometer for measurement of gamma-emitting nuclides in the human lungs. Part 1. Results of experimental and theoretical researches. *Measuring instruments and methods*. 2013;1(6): 29-35. (In Russian).
3. Lépy M-C, Altizoglou T, Anagnostakis MJ. Intercomparison of methods for coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*. 2012;70(9): 2112–2118.
4. Vidmar T, Caponi M, Hult M. Equivalence of computer codes for calculation of coincidence summing correction factors. *Applied Radiation and Isotopes*. 2014;87: 336–341.
5. Pric V. Evaluation of the influence of x-ray parameters on various dose characteristics using software MCC-3D [Text]: master's thesis. Saint-Petersburg; 2015: 81. (In Russian).
6. Tekin HO. MCNP-X Monte Carlo Code Application for Mass Attenuation Coefficients of Concrete at Different Energies by Modeling 3 × 3 Inch NaI(Tl) Detector and Comparison with XCOM and Monte Carlo Data. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2016;7(31): 1-7.
7. Bagaev K, Kozlovski S, Novikov I. A program for three-dimensional simulation of systems for detecting and registering ionizing radiation based on an advanced graphical interface. *ANRI = ANRI*. 2007;4: 35 – 40. (In Russian).
8. Kobzar AI. Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists. Moscow: FIZMATLIT. 2006:816. (In Russian).

Received: May 26, 2020

**For correspondence: Darya V. Arefyeva** – Acting Head of Laboratory No. 1, Research Institute of Industrial and Marine Medicine of the Federal Medical Biological Agency (prospekt Yuriya Gagarina, 65, Saint-Petersburg, 196143, Russia; E-mail: niipmm.210@gmail.com)

**Vladimir B. Firsanov** – Research Engineer, Laboratory No. 1, Research Institute of Industrial and Marine Medicine of the Federal Medical Biological Agency, Saint-Petersburg, Russia

**Dmitriy D. Kuruch** – Candidate of Chemical Sciences, Research Engineer of Laboratory No. 1, Research Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical Biological Agency, Saint Petersburg, Russia

**Roman E. Bryukhov** – Head of Technical Department Scientific Technical Centre «RADEK», Saint-Petersburg, Russia

**Voldemar A. Tarita** – Candidate of medical science, Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Human Radiation Spectrometry, Leading Researcher, Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

**For citation: Arefyeva D.V., Firsanov V.B., Kuruch D.D., Bryukhov R.E., Tarita V.A. Gamma scintillation spectrometer calibration using the method of mathematical modeling. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 93-100. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-93-100**

**Darya V. Arefyeva**

Research Institute of Industrial and Marine Medicine

**Address for correspondence:** prospekt Yuriya Gagarina, 65, Saint-Petersburg, 196143, Russia; E-mail: niipmm.210@gmail.com

## Results of international comparison tests on determination of $^{137}\text{Cs}$ activity concentration in soil samples

Valery P. Ramzaev<sup>1</sup>, Christian Bernhardsson<sup>2</sup>, Alexander A. Dvornik<sup>3</sup>, Zhanna V. Bakarikova<sup>4</sup>, Olof Karlberg<sup>5</sup>, Alexander V. Vodovатов<sup>1</sup>, Mattias Jönsson<sup>2</sup>, Vladislav A. Nekrasov<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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Medical Radiation Physics, Department of Translational Medicine, Lund University, Malmö, Sweden

<sup>3</sup> Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

<sup>4</sup> Republican Centre for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>5</sup> Swedish Radiation Safety Authority, Stockholm, Sweden

*In 2016–2019, comparison tests of different methods for quantitative determination of the content of the technogenic radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples were performed. Soil samples were collected from areas with high and low  $^{137}\text{Cs}$  contamination in Belarus. The intercomparison was performed as a part of an ongoing Russian–Swedish–Belarusian cooperation on the assessment of radioactive contamination of the environment. Three laboratories of the regular participants in the project and three laboratories from other facilities participated in the intercomparison that was focused on the samples of cultivated soil from the Gomel region (the first stage of comparisons, 3 samples) and the Grodno region (the second stage of comparisons, 4 samples). Results on activity concentrations in the samples presented by the participants were in satisfactory agreement with each other. The maximum deviation from the average value, that had been calculated for each sample based on the individual results from all laboratories, was 14%. Stage-averaged deviations from the inter-laboratory mean did not exceed 10%. Results of the comparison tests should be taken into consideration when comparing or merging experimental data from different laboratories participating in the Russian–Swedish–Belarusian cooperation project.*

**Key words:** intercomparison, soil,  $^{137}\text{Cs}$ , Belarus, Russia, Sweden.

## Результаты международных сравнительных испытаний по определению удельной активности $^{137}\text{Cs}$ в пробах почвы

В.П. Рамзаев<sup>1</sup>, К. Бернхардссон<sup>2</sup>, А.А. Дворник<sup>3</sup>, Ж.В. Бакарикova<sup>4</sup>, О. Карлберг<sup>5</sup>, А.В. Водоватов<sup>1</sup>, М. Йонссон<sup>2</sup>, В.А. Некрасов<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> Группа медицинской радиационной физики, кафедра трансляционной медицины, Университет Лунда, Мальмё, Швеция

<sup>3</sup> Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

<sup>4</sup> Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды Республики Беларусь, Минск, Беларусь

<sup>5</sup> Шведское агентство по радиационной безопасности, Стокгольм, Швеция

*В 2016–2019 гг. были проведены сравнительные испытания методов количественного определения содержания техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы. Пробы почвы были отобраны в районах с высоким и низким уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  в Беларуси. Данные испытания были выполнены в*

**Valery P. Ramzaev**

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

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

**Рамзаев Валерий Павлович**

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

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

*рамках продолжающегося российско-шведско-белорусского сотрудничества по оценке радиоактивного загрязнения окружающей среды. Лаборатории трех постоянных участников проекта и три лаборатории из других учреждений приняли участие в сличительном испытании, в процессе которого были проанализированы пробы культивируемой почвы из Гомельской области (первый этап сличений, 3 образца) и Гродненской области (второй этап сличений, 4 образца). Результаты определения удельной активности в образцах, представленные участниками, находились в удовлетворительном схождении друг с другом. Максимальное отклонение от среднего значения, которое было рассчитано для каждого образца на основе индивидуальных результатов всех лабораторий, участвовавших в испытаниях, составило 14%. Значения отклонений от межлабораторного среднего, усредненные по выполненным стадиям испытаний, не превышали 10%. Результаты проведенных сличительных испытаний следует учитывать при оценке или группировке экспериментальных данных, полученных в конкретных лабораториях, участвующих в российско-шведско-белорусском проекте.*

**Ключевые слова:** сличительные испытания, почва,  $^{137}\text{Cs}$ , Беларусь, Россия, Швеция.

## Introduction

For almost one decade, an international group of researchers from the Institute of Radiobiology of the Academy of Sciences of Belarus (IRB), Lund University, Sweden (LU), and St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Russia (IRH) have been cooperating in various projects related to environmental radiology.

In 2016–2018, the group carried out assessments of the radiation environment in the Chernobyl contaminated Vetka district in the Gomel region of Belarus [1]. An important part of that project was to evaluate the inventory and depth distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in soil, and to determine the corresponding gamma dose rate in air at various locations. Apart from IRB, LU and IRH, two additional laboratories were participating in the laboratory comparison tests carried out in parallel: one in Belarus [Research Institute of Radiology, Gomel (RIR)] and one in Sweden [Swedish Radiation Safety Authority, Stockholm (SSM)].

Recently, in 2019, the group carried out a zero point assessment of the radiation environment in the area of the construction of the Belarusian NPP (the Astrovets district of the Grodno region) [2]. Representatives of the Republican Centre for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring of the Republic of Belarus (Belhydromet) participated in the work in Astrovets as well. One of the main objectives of that project was to study the content of technogenic radionuclides in environmental media. In particular, the purpose of the collection and subsequent laboratory analysis of the environmental samples was to obtain data on activity concentration of  $^{137}\text{Cs}$ , the only technogenic gamma-emitting radionuclide which is distributed all over the world.

An important part of both Russian–Swedish–Belarusian projects was to carry out comparative interlaboratory tests to determine the activity concentration of  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples.

The **aim** of this work is to analyze the measurement results presented by the laboratories participating in the comparison tests.

## Materials and methods

The comparison tests were carried out in two stages. Main participants (LU, IRB, IRH) took part in each stage. At the first stage (in 2016), samples for comparison were additionally sent to SSM and RIR. In 2018, RIR was unified with IRB. At the second stage (in 2019), in addition to the three main participants, Belydromet participated in the comparison tests.

## Введение

В течение последних десяти лет международная группа исследователей из Института радиобиологии Академии наук Беларуси (IRB), Лундского университета, Швеция (LU) и Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаев, Россия (IRH) сотрудничают в различных проектах, связанных с исследованиями радиоактивного загрязнения окружающей среды.

В 2016–2018 гг. данная группа провела оценку радиационной обстановки в Ветковском районе Гомельской области Беларуси [1]. Важной частью этого проекта было изучение запаса и распределения по глубине  $^{137}\text{Cs}$  в почве, а также определение мощности дозы гамма-излучения в воздухе в различных локациях. Помимо IRB, LU и IRH, еще две приглашенные лаборатории участвовали в лабораторных сличительных испытаниях, проводимых параллельно: одна в Беларуси [Научно-исследовательский институт радиологии, Гомель (RIR)] и одна в Швеции [Шведское управление радиационной безопасности, Стокгольм (SSM)].

В 2019 г., данная группа провела оценку радиационной обстановки в районе строительства Белорусской АЭС (Островецкий район Гродненской области) [2]. В полевых работах на Островце также приняли участие представители Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды Республики Беларусь (Белгидромет). Одной из основных задач этого проекта было определение удельной активности техногенных радионуклидов в пробах окружающей среды. В частности, целью отбора и последующего лабораторного анализа проб окружающей среды было получение данных об удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , единственного техногенного гамма-излучателя, который можно обнаружить по всему миру. При этом важной частью исследований являлось проведение сличительных межлабораторных испытаний по определению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы.

**Цель исследования** – анализ результатов, представленных участниками сличительных испытаний.

## Материалы и методы

Сличения были проведены в два этапа. В каждом из этапов принимали участие LU, IRB, IRH (основные участники). На первом этапе (2016 г.) образцы для сличения были дополнительно направлены в SSM и RIR. В 2018 г.

At the first stage, three samples of soil heavily contaminated with  $^{137}\text{Cs}$  due to the Chernobyl accident were used as a subject for comparison. Samples were taken in June 2016 in one of the abandoned gardens (52.649° N, 31.326° E) located in the resettlement zone on the territory of the former settlement of Bartolomeevka in the Vetka district of the Gomel region of Belarus. In 1986, the  $^{137}\text{Cs}$  contamination density of the Bartolomeevka territory exceeded 555 kBq/m<sup>2</sup> [3]. After the Chernobyl accident, this area had been cultivated for some time, which led to mechanical mixing of the upper 0–20 cm soil layer and to a relatively uniform distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in this layer [1]. These conditions were decisive in the selection of cultivated soil for comparisons. Three flat plots (each area is ~1 m<sup>2</sup>) were selected on the site. The distance between these plots was approximately 5 m. Three cores of soil were taken at each plot. The authors used a cylindrical sampler with a length of 25 cm and an internal cross-sectional area of 20 cm<sup>2</sup> for soil sampling. The grass roots and other large organic fragments were removed from the cores whereas stones and gravel were absent in the soil. The mechanical composition of the soil corresponded to loamy-sand type. The material of the three cores was combined into one sample, and the soil was thoroughly mixed. Each of the main participants received 600–650 g (wet weight) of soil material from each of the three plots. Samples were not encrypted, as representatives of all main laboratories took part in the field work.

In the second stage, four samples of soil that were less contaminated with  $^{137}\text{Cs}$  (mainly as a result of global fallout from nuclear weapons tests in the atmosphere) were used for intercomparison. Samples were obtained in September 2019 from a cultivated meadow (54.770° N, 26.000° E) located in the village of Berezovka, the Astrovets district, the Grodno region of Belarus. According to [4], the expected contamination density of  $^{137}\text{Cs}$  from global and Chernobyl fallout in this site should be less than 2 kBq/m<sup>2</sup>. Sampling was carried out on a flat area with a size of approximately 0.5 × 0.5 m<sup>2</sup>. The upper turf layer (0–5 cm) was removed with a shovel and excluded from analysis due to the presence of a large mass of plant roots. Samples for comparison were taken using a shovel sampler from depths of 5–10, 10–15, 15–20 and 20–25 cm. The soil was sandy-loam type. Each sample was thoroughly mixed and divided into four, approximately equal parts. Each of the four participants received 220–250 g of the material from each sample (depth layer) for the analysis.

All laboratories dried their samples prior to measurements. To measure the  $^{137}\text{Cs}$  activity in the samples, the laboratories participating in the comparison tests used lead-shielded stationary semiconductor (HPGe) or scintillation [NaI(Tl)] gamma spectrometers. The final goal of each laboratory was to present the activity concentration (AC) of  $^{137}\text{Cs}$  in each sample (on dry weight basis) and to indicate the total uncertainty of the presented value of AC with a confidence level of 95%. At the will of the participants, it was possible to provide a value of the statistical uncertainty in estimating the 662 keV photopeak area, as well as the data on the preparation of samples for measurements and on the calibration of spectrometers.

Since not one of the participants of the comparison tests could claim the role as a reference laboratory, it was decided to apply a reference value corresponding to the average value of  $^{137}\text{Cs}$  AC calculated from the results presented for each sample by all participating laboratories. As a criterion of compliance, a 10 percent deviation from the average was selected.

RIR был объединен с IRB. На втором этапе (2019 г.), помимо трех основных участников, в сличениях участвовал Белгидромет.

На первом этапе в качестве объекта для сличения использовали три пробы почвы, существенно загрязненной  $^{137}\text{Cs}$  в результате Чернобыльской аварии. Пробы были отобраны в зоне отселения на территории бывшего населенного пункта Бартоломеевка в Ветковском районе Гомельской области Беларуси в июне 2016 г. В 1986 г. плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  территории Бартоломеевки превышала 555 кБк/м<sup>2</sup> [3]. Отбор проб был осуществлен на одном из заброшенных огородов (52,649° с.ш., 31,326° в.д.). После Чернобыльской аварии этот участок на протяжении некоторого времени подвергался культивации, что привело к механическому перемешиванию верхнего 0–20 см слоя почвы и, соответственно, к весьма равномерному распределению  $^{137}\text{Cs}$  в данном слое [1]. Это обстоятельство было определяющим в выборе именно культивированной почвы для проведения сличений. На участке были найдены три ровные площадки (площадь каждой ~1 м<sup>2</sup>). Расстояние между площадками было равно примерно 5 м. На каждой площадке было отобрано по три керна земли. Для отбора мы использовали цилиндрический пробоотборник длиной 25 см и площадью внутреннего сечения 20 см<sup>2</sup>. Из кернов были удалены корни травы и прочие крупные органические фрагменты. Камни и гравий в почве отсутствовали. По механическому составу почва соответствовала легкому суглинку. Материал трех кернов был объединен в одну пробу, и почва была тщательно перемешана. Каждый из основных участников получил по 600–650 г (сырой вес) почвенного материала с каждой из трех площадок. Пробы не подвергались шифровке, так как в полевых работах принимали участие представители всех основных лабораторий.

На втором этапе для сличений использовали четыре пробы почвы, слабо загрязненной  $^{137}\text{Cs}$ , в основном в результате глобальных выпадений от испытаний ядерного оружия в атмосфере. Пробы были получены в сентябре 2019 г. с культивированного луга (54,770° с.ш., 26,000° в.д.), расположенного в населенном пункте Берёзовка Островецкого района Гродненской области Беларуси. По данным [4], ожидаемая плотность загрязнения территории в этом регионе  $^{137}\text{Cs}$  (от глобальных и чернобыльских выпадений) должна быть менее 2 кБк/м<sup>2</sup>. Отбор проб был выполнен на ровной площадке размером приблизительно 0,5 × 0,5 м<sup>2</sup>. Верхний дерновой слой (0–5 см) был удален с помощью лопаты и исключен из анализа в связи с наличием большого количества корней растений. Пробы для сличения были отобраны с помощью совкового пробоотборника с глубины 5–10, 10–15, 15–20 и 20–25 см. Почва была среднесуглинистой. Каждая проба была тщательно перемешана и разделена на 4 примерно равные части. Каждый из 4 участников получил для анализа по 220–250 г материала из каждой пробы.

Во всех лабораториях пробы были высушены перед измерениями. Для измерения активности  $^{137}\text{Cs}$  в образцах лаборатории-участники сличений использовали стационарные полупроводниковые (HP-Ge) или сцинтилляционные [NaI(Tl)] гамма-спектрометры. Конечной задачей каждой лаборатории было представление значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в каждом образце (на сухой вес) с указанием полной неопределенности представленного

### Results and discussion

Results of determination of the  $^{137}\text{Cs}$  AC in soil samples from Bartolomeevka (first stage in 2016) are presented in Table 1. The reported values were in the range from 1660 to 2700 Bq/kg for the three plots within the same area. The observed scatter was, to a certain extent, related to differences between the sampled plots. For the plot "B", all participants indicated the highest values (on average 2540 Bq/kg), and for the plot "C", all participants reported the lowest values of the  $^{137}\text{Cs}$  AC (on average 1880 Bq/kg). The difference between the average values for these plots was 1.35 times. The values of the total uncertainty in the estimation of AC in individual samples ranged from 6.2% to 15%.

Deviations of the obtained individual values of AC from the average values for individual plots, for individual participants, ranged from  $-11.7\%$  to  $+11.7\%$  (Table 2). The deviations averaged over all three plots ranged from  $-8.6\%$  to  $+8.2\%$ . These values do not exceed the 10 percent criterion of compliance. Therefore, we can state satisfactory agreement between the methods and standards used in the laboratories participating in the comparison tests for the quantitative determination of  $^{137}\text{Cs}$  in soil with high levels of contamination. At the same time, it should be noted that the LU, SSM and IRH laboratories provided values that were higher than the average values. On the contrary and correspondingly, for the IRB and RIR laboratories, all values were lower than the average values.

The experimentally determined values of the  $^{137}\text{Cs}$  AC in soil samples from Berezovka (second stage in 2019) ranged from 3.2 to 6.4 Bq/kg (Table 3) for the  $4 \times 4$  samples and layers. The observed twofold scatter was associated primarily with the uneven vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the soil. All participants reported the lowest values of the AC (range 3.2–4.1 Bq/kg; average = 3.7 Bq/kg) in the deepest soil layer (20–25 cm). In the three upper layers, the distribution of the radionuclide was more uniform: a range for the averages was 5.2–5.8 Bq/kg. Such a distribution of  $^{137}\text{Cs}$  is a characteristic for the fields that have been cultivated for many years after a radioactive fallout (e.g., [5, 6]).

The total uncertainty of measuring the relatively low AC of  $^{137}\text{Cs}$ , shown in Table 3, ranged from 11 to 20%. These values were expected to be larger than the uncertainty values for the  $^{137}\text{Cs}$  AC in the highly contaminated samples from Bartolomeevka.

значения при доверительной вероятности 95%. Однако по желанию участников можно было представить оценку статистической неопределенности оценки площади фотопика с энергией 662 кэВ, а также данные о подготовке образцов к измерениям и о калибровке спектрометров.

Так как ни один из участников сличений не мог претендовать на роль референтной лаборатории, было решено использовать в качестве референтного значения удельной активности среднее значение, вычисленное по результатам, представленным для каждой пробы всеми лабораториями-участниками. В качестве критерия соответствия было выбрано 10% значение отклонения от среднего.

### Результаты и обсуждение

Результаты определения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы из Бартоломеевки (первая фаза, 2016 г.) представлены в таблице 1. Полученные значения находились в диапазоне от 1660 до 2700 Бк/кг. Наблюдаемый разброс в оценках удельной активности в определенной мере был связан с различиями между площадками по удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почве. Для площадки В все участники указали наибольшие значения (в среднем 2540 Бк/кг), а для площадки С все участники получили наименьшие значения (в среднем 1880 Бк/кг) удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$ . Эти средние величины различались в 1,35 раза. Значения общей неопределенности оценки удельной активности в индивидуальных образцах находились в диапазоне от 6,2% до 15%.

Отклонения полученных индивидуальных значений удельной активности от средних значений по отдельным площадкам для отдельных участников варьировали от  $-11,7\%$  до  $+11,7\%$  (табл. 2). Усредненные по всем трем площадкам отклонения лежали в диапазоне от  $-8,6\%$  до  $+8,2\%$ . Эти величины не превышают 10% критерия соответствия. Поэтому можно констатировать удовлетворительную сходимости между методами и стандартами, применяемыми в лабораториях-участниках сличений для количественного определения  $^{137}\text{Cs}$  в почве при высоких уровнях загрязнения. Вместе с тем, следует отметить, что для лабораторий LU, SSM и IRH имелось превышение средних значений, и напротив, для лабораторий IRB и RIR все значения были ниже, чем средние величины.

Activity concentration (on dry weight basis) of  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples from Bartolomeevka

Table 1

Удельная активность (на сухую массу)  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы из Бартоломеевки

[Таблица 1]

Laboratory [Лаборатория]	Activity concentration (Bq/kg) in the sample: [Удельная активность (Бк/кг) в пробе:]		
	A	B	C
LU	2120 (6.2)	2660 (7.0)	1970 (7.0)
IRH	2200 (15)	2570 (15)	1930 (15)
IRB	1970 (11)	2350 (11)	1660 (11)
SSM	2250 (11)	2700 (11)	2100 (11)
RIR	2030 (12)	2440 (12)	1740 (12)
Mean [Средняя]	2110	2540	1880
Standard deviation [Стандартное отклонение]	120	150	180

Uncertainty of measurement is given in brackets (percent, the 95% probability). [Неопределенность измерения приведена в скобках (процент, с вероятностью 95%).]

Table 2  
Deviation of the individual values of  $^{137}\text{Cs}$  activity concentration in the Bartolomeevka soil samples from the interlaboratory mean value (%)

Отклонение индивидуальных значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в образцах почвы из Бартоломеевки от межлабораторного среднего значения (%)

[Таблица 2]

Laboratory [Лаборатория]	Deviation (%) for the sample: [Отклонение (%) для пробы:]			
	A	B	C	Average [Средняя]
LU	0.5	4.7	4.8	3.3
IRH	4.3	1.2	2.7	2.7
IRB	-6.6	-7.5	-11.7	-8.6
SSM	6.6	6.3	11.7	8.2
RIR	-3.8	-3.9	-7.4	-5.1

Table 3  
Activity concentration (on dry weight basis) of  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples from Berezovka

Удельная активность (на сухую массу)  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы из Берёзовки

[Таблица 3]

Laboratory [Лаборатория]	Activity concentration (Bq/kg) in the sample: [Удельная активность (Бк/кг) в пробе:]			
	5–10 cm	10–15 cm	15–20 cm	20–25 cm
LU	5.91 (14)	5.56 (16)	5.89 (20)	3.65 (11)
IRH	6.36 (17)	6.18 (17)	5.66 (17)	3.76 (17)
IRB	5.60 (12)	5.62 (12)	5.12 (12)	4.08 (12)
Belhydromet	5.4 (15)	5.6 (14)	4.6 (15)	3.2 (16)
Mean [Средняя]	5.82	5.74	5.32	3.67

Uncertainty of measurement is given in brackets (percent, the 95% probability).

[Неопределенность измерения приведена в скобках (процент, с вероятностью 95%).]

The deviation of the individual values of the  $^{137}\text{Cs}$  AC from the average value for a layer varied from -14% to +11% (Table 4). The layer-averaged deviations for individual laboratories ranged from -9.0% to +6.4%. These values do not exceed the declared values for assessing the total uncertainty of the measurement of the  $^{137}\text{Cs}$  AC and the 10 percent criterion of compliance. In general, the agreement between results reported by the different laboratories for the relatively low activity concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  should be considered satisfactory.

The differences in the values of the  $^{137}\text{Cs}$  AC presented for individual samples by laboratories in the first and second stages could be explained by both random factors and systematic factors. The random factors include a possible uneven distribution of the radionuclide in the original soil samples. The mixing of soil material after sampling was carried out in the field and, of course, it was not ideal. To check the degree of this mixing unevenness, pairs of aliquots taken from samples A, B, C were measured at LU. The discrepancy between the values of the  $^{137}\text{Cs}$  AC in each pair ranged from 2% to 4%. In part, this discrepancy can be explained by the statistical uncertainty in estimating the 662 keV photopeak area (up to 1.5%). This uncertainty also belongs to the group of random errors. According to IRH and IRB reports, the uncertainty in estimating the area of the 662 keV photopeak was within  $\pm 3.3\%$  for the highly contaminated samples from Bartolomeevka. For the less contaminated samples from Berezovka, the error in determination of the area of the 662 keV photopeak could reach  $\pm 5\%$ .

Экспериментально определенные значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы из Берёзовки находились в диапазоне от 3,2 до 6,4 Бк/кг (табл. 3). Наблюдаемый двукратный разброс был связан, прежде всего, с неравномерным вертикальным распределением цезия в почве. Все участники сообщили о наименьших значениях удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (диапазон 3,2–4,1 Бк/кг; средняя = 3,7 Бк/кг) в самом нижнем слое на глубине 20–25 см. В трех верхних слоях распределение радионуклида было более равномерным (диапазон средних значений: 5,2–5,8 Бк/кг). Такое распределение  $^{137}\text{Cs}$  весьма характерно для полей, подвергавшихся культивации на протяжении многих лет после выпадений радиоактивного цезия из атмосферы (например, [5, 6]).

Общая неопределенность измерения сравнительно низких удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$ , указанных в таблице 3, находилась в диапазоне от 11 до 20%. Эти значения были ожидаемо несколько выше, чем значения неопределенности оценки удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  для высокоактивных проб из Бартоломеевки.

Отклонение индивидуальных значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  от среднего значения для каждого слоя варьировало от -14% до +11% (табл. 4). Усредненные по слоям отклонения для отдельных лабораторий находились в диапазоне от -9,0% до +6,4%. Эти величины не превышают заявленных значений оценки общей неопределенности измерения удельной активности и 10% критерия соответствия. В целом, соответствие между сообщенными лабораториями результатами для срав-

Systematic differences between laboratories could be associated primarily with the use of different standards for calibrating spectrometers. For example, the uncertainty of the content of gamma-emitting radionuclides in standard volumetric measures (reference radiation sources) in the IRH laboratory is 6–7% (with a confidence level of 95%). The systematic uncertainty can increase by several percent when constructing a gamma-quantum registration efficiency curve for a spectrometer.

To reliably estimate the magnitude of systematic discrepancies between laboratories, it is necessary to have such a number of observation pairs that allows the use of an appropriate statistical test. In particular, for the main participants of the comparisons, it was possible to make an assessment using the nonparametric Wilcoxon match pair test after merging results of the first and second stages of the comparisons (Table 5). The differences in the LU/IRH (median = 3%) and LU/IRB (median = 8%) pairs were statistically nonsignificant ( $P > 0.05$ ;  $n = 7$ ). At the same time, for the IRH/IRB pair, the calculated difference (median = 11%) was statistically significant ( $P < 0.05$ ;  $n = 7$ ).

### Conclusion

In the framework of the ongoing Russian–Swedish–Belarusian cooperation on the assessment of radioactive

нительно малых удельных активностей следует признать удовлетворительными.

Различия в значениях удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , представленных для индивидуальных проб лабораториями на первом и втором этапе, могли быть связаны как со случайными, так и с систематическими факторами. К случайным факторам следует отнести возможную неравномерность распределения радионуклида в исходных пробах почвы. Перемешивание почвенного материала после отбора проводилось в полевых условиях и, конечно, не являлось идеальным. Для проверки степени этой неравномерности перемешивания в LU было проведено измерение пар аликвот, отобранных из проб площадок А, В и С. Расхождение между значениями удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в каждой паре колебалось от 2% до 4%. Частично это расхождение можно объяснить статистической неопределенностью оценки площади фотопика 662 кэВ (до 1,5%). Эта неопределенность также относится к группе случайных ошибок. По данным IRH и IRB, неопределенность оценки площади фотопика  $^{137}\text{Cs}$  находилась в пределах 3,3% для высокоактивных проб из Бартоломеевки. Для малоактивных проб из Берёзовки величина неопределенности вычисления площади фотопика 662 кэВ могла достигать 5%.

Table 4

**Deviations of the individual values of  $^{137}\text{Cs}$  activity concentration in the Berezovka soil samples from the interlaboratory mean value (%)**

**Отклонение индивидуальных значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в образцах почвы из Берёзовки от межлабораторного среднего значения (%)**

[Таблица 4]

Laboratory [Лаборатория]	Deviation (%) for the sample: [Отклонение (%) для пробы:]				
	5–10 cm	10–15 cm	15–20 cm	20–25 cm	Average [Средняя]
LU	1.5	–3.1	10.7	–0.5	2.1
IRH	9.3	7.7	6.4	2.5	6.4
IRB	–3.8	–2.1	–3.8	11.2	0.4
Belhydromet	–7.2	–2.4	–13.5	–12.8	–9.0

Table 5

**Activity concentrations (on dry weight basis) of  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples from Bartolomeevka and Berezovka determined by the LU, IRH and IRB laboratories, and the activity concentrations ratio**

**Значения удельной активности (на сухую массу)  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы из Бартоломеевки и Берёзовки по данным лабораторий LU, IRH и IRB и соотношение удельных активностей**

[Таблица 5]

Site [Место]	Sample code [Код пробы]	Activity concentration (Bq/kg) [Удельная активность (Бк/кг)]			Activity concentrations ratio [Отношение удельных активностей]		
		LU	IRH	IRB	LU/IRH	LU/IRB	IRH/IRB
Bartolomeevka [Бартоломеевка]	A	2120	2200	1970	0.96	1.08	1.12
Bartolomeevka [Бартоломеевка]	B	2660	2570	2350	1.04	1.13	1.09
Bartolomeevka [Бартоломеевка]	C	1970	1930	1660	1.02	1.19	1.16
Berezovka [Берёзовка]	5–10 cm	5.91	6.36	5.60	0.93	1.06	1.14
Berezovka [Берёзовка]	10–15 cm	5.56	6.18	5.62	0.90	0.99	1.10
Berezovka [Берёзовка]	15–20 cm	5.89	5.66	5.12	1.04	1.15	1.11

Site [Место]	Sample code [Код пробы]	Activity concentration (Bq/kg) [Удельная активность (Бк/кг)]			Activity concentrations ratio [Отношение удельных активностей]		
		LU	IRH	IRB	LU/IRH	LU/IRB	IRH/IRB
Berezovka [Берёзовка]	20–25 cm	3.65	3.76	4.08	0.97	0.89	0.92
	Median [Медиана]				0.97	1.08	1.11
	Mean [Средняя]				0.98	1.07	1.09
	Standard deviation [Стандартное отклонение]				0.05	0.10	0.08

contamination of the environment, comparison tests of methods for quantitative determination of the content of the technogenic radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples were performed. Three laboratories of regular participants of the cooperation and three laboratories from other organizations participated in the study. Samples of cultivated soil from the Gomel region (first stage of comparisons, 3 samples) and the Grodno region (second stage of comparisons, 4 samples) of Belarus were taken as the subjects for the tests. Results presented by the participants were in satisfactory agreement with each other. The maximum deviation from the average value calculated for each sample according to individual results from the laboratories was 14%. Stage-averaged deviations from the mean did not exceed 10%. For the three laboratories (LU, IRH and IRB), that participated in both stages (total number of samples = 7), statistical significance of the differences between presented results was evaluated. The differences in the LU/IRH (median = 3%) and LU/IRB (median = 8%) pairs were statistically nonsignificant ( $P > 0.05$ ). For the IRH/IRB pair, the observed difference (median = 11%) was statistically significant ( $P < 0.05$ ). These differences and their statistical significance should be considered when combining and interpreting the results of measurements obtained in the laboratories-participants of the intercomparison.

Систематические различия между лабораториями могли быть связаны, прежде всего, с использованием разных стандартов для калибровки спектрометров. Например, по данным IRH, неопределенность содержания гамма-излучающих радионуклидов в стандартных объемных мерах (референтных источниках излучения) составляет 6–7% (при доверительной вероятности 95%). При построении кривой эффективности регистрации гамма-квантов спектрометром и при переходе от стандартной плотности референтного образца к реальной плотности экспериментального образца систематическая неопределенность может увеличиваться на несколько процентов.

Для надежной оценки величины систематических расхождений между лабораториями необходимо иметь такое количество пар наблюдений, которое позволяет применить соответствующий статистический тест. В частности, для основных участников сличений такую оценку оказалось возможным сделать с использованием непараметрического критерия Вилкоксона после объединения результатов первого и второго этапов сличений (табл. 5). Различия в парах LU/IRH (медиана = 3%) и LU/IRB (медиана = 8%) были статистически незначимыми ( $P > 0,05$ ;  $n = 7$ ). Вместе с тем, для пары IRH/IRB обнаруженные различия (медиана = 11%) оказались уже статистически значимыми ( $P < 0,05$ ;  $n = 7$ ).

### Заключение

В рамках продолжающегося российско-шведско-белорусского сотрудничества по оценке радиоактивного загрязнения окружающей среды в 2016–2019 гг. было выполнено сличение методов количественного определения содержания техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы. В сличении приняли участие три лаборатории постоянных участников проекта и три присоединившиеся лаборатории из других организаций. В качестве объектов для сличения были взяты образцы культивированной почвы из Гомельской области (первый этап сличений, 3 пробы) и Гродненской области (второй этап сличений, 4 пробы) Республики Беларусь. Представленные участниками результаты измерений находились в удовлетворительном схождении друг с другом. Максимальное отклонение от среднего значения, вычисленного для каждой пробы по индивидуальным результатам от лабораторий, равнялось 14%. Усредненные по этапам отклонения от среднего не превышали 10%. Для трех лабораторий (LU, IRH и IRB), которые участвовали в обоих этапах сличительных испытаний (общее число проб = 7), была изучена статис-

тическая значимость обнаруженных различий в представленных результатах. Различия в парах LU/IRH (медиана = 3%) и LU/IRB (медиана = 8%) были статистически незначимыми ( $P > 0,05$ ). Для пары IRH/IRB обнаруженные различия (медиана = 11%) оказались статистически значимыми ( $P < 0,05$ ). Данные различия и их статистическую значимость следует учитывать при объединении и интерпретации результатов измерений, полученных (и получаемых) в лабораториях-участниках сличений.

### References

#### [Литература]

1. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M, et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;214–215: 106168.
2. Bernhardsson C, Stenström KE, Mattsson S, Jönsson M, Pedehontaa-Hiaa G, Rääf C, et al. Zero point assessment of the radiation environment – examples of a program applied in Sweden (ESS) and in Belarus (BelNPP). Proceedings of International Conference “Medical Physics 2019” 7–9 November 2019, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania. 2019. P. 85–88.
3. Izrael YuA, Bogdevich IM. The Atlas of Recent and Predictable Aspects of Consequences of Chernobyl Accident on Polluted Territories of Russia and Belarus (ARPA Russia–Belarus). «Infosphere» Foundation–NIA–Nature, Moscow–Minsk. 2009. (In Russian with English summary). Available on: <http://rb.mchs.gov.ru/Atlas>. (accessed 19.11.2019)
4. De Cort M, Dubois G, Fridman ShD, Germenchuk MG, Izrael YuA, Janssens A, et al. Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident. European Commission Report EUR 16733, Luxembourg. 1998.
5. Poreba G, Bluszcz A, Snieszko Z. Concentration and vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in agricultural and undisturbed soils from Chechlo and Czarnocin areas. *Geochronometria*. 2003;22: 67–72.
6. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.

Received: 28 July, 2020

Поступила: 28.07.2020 г.

---

**Valery P. Ramzaev** – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher, 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 Well-Being. **Address for correspondence:** Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

**Christian Bernhardsson** – PhD of Clinical Sciences, Associate Professor in Medical Radiation Physics, Medical Radiation Physics, Department of Translational Medicine, Lund University, Malmö, Sweden

**Alexander A. Dvornik** – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Modeling and Anthropogenic Risks Minimization, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

**Zhanna V. Bakarikova** – Deputy Chief of Radiation Monitoring Service, Republican Centre for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring of the Republic of Belarus (Belhydromet), Minsk, Belarus

**Olof Karlberg** – Consultant in Radiation Protection and Monitoring, Swedish Radiation Safety Authority, Stockholm, Sweden

**Alexander V. Vodovatov** – Candidate of Biological Sciences, 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, Saint-Petersburg, Russia

**Mattias Jönsson** – Laboratory Engineer, Medical Radiation Physics, Department of Translational Medicine, Lund University, Malmö, Sweden

**Vladislav A. Nekrasov** – Junior Researcher, 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia.

---

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

**Бернхардссон Кристиан** – PhD по медицине, доцент, группа медицинской физики, кафедра трансляционной медицины, Университет Лунда, Мальмё, Швеция

**Дворник Александр Александрович** – кандидат биологических наук, руководитель лаборатории моделирования и минимизации антропогенных рисков, Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

**Бакарикова Жанна Владимировна** – заместитель начальника службы радиационного мониторинга, Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды Республики Беларусь, Минск, Беларусь

**Карлберг Олоф** – консультант по радиационной защите и мониторингу, Шведское агентство по радиационной безопасности, Стокгольм, Швеция

**Водоватов Александр Валерьевич** – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Йонссон Маттиас** – инженер-исследователь, группа медицинской физики, кафедра трансляционной медицины, Университет Лунда, Мальмё, Швеция

**Некрасов Владислав Аркадьевич** – младший научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**For citation (Для цитирования):** Ramzaev V.P., Bernhardsson C., Dvornik A.A., Bakarikova Zh.V., Karlberg O., Vodovатов A.V., Jönsson M., Nekrasov V.A. Results of international comparison tests on determination of <sup>137</sup>Cs activity concentration in soil samples. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 101-109. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-101-109

## Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2019 г.

А.Н. Барковский<sup>1</sup>, Руслан Р. Ахматдинов<sup>1</sup>, Рустам Р. Ахматдинов<sup>1</sup>, А.М. Библин<sup>1</sup>, А.А. Братилова<sup>1</sup>, В.Е. Журавлева<sup>2</sup>, Т.А. Кормановская<sup>1</sup>, С.И. Кувшинников<sup>3</sup>, А.Г. Сивенков<sup>2</sup>, О.Е. Тутельян<sup>3</sup>, А.Г. Цовьянов<sup>2</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> Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

<sup>3</sup> Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

*В статье представлены результаты анализа сведений о дозах техногенного облучения персонала и населения за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов, облучения населения за счет природных источников и техногенно-измененного радиационного фона и медицинского облучения пациентов, полученных по данным Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан РФ за 2019 г. Анализ выполнен на основе данных, содержащихся в формах государственного статистического наблюдения № 1-ДОЗ, № 2-ДОЗ, № 3-ДОЗ и № 4-ДОЗ за 2019 г., представленных организациями и территориями, государственный санитарно-эпидемиологический надзор за которыми осуществляется Роспотребнадзором и Федеральным медико-биологическим агентством России. В статье использованы также данные, полученные в рамках радиационно-гигиенической паспортизации. В 2019 г. 18 430 организаций, осуществляющих обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения, представили формы № 1-ДОЗ, содержащие сведения о дозах облучения персонала общей численностью 247 934 человека, из которых 227 723 человека – персонал группы А и 20 211 человек – персонал группы Б, для которого дозы получены по результатам индивидуального дозиметрического контроля. По данным Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации, средняя индивидуальная годовая эффективная доза техногенного облучения персонала группы А в 2019 г. составила 1,19 мЗв, а персонала группы Б – 0,64 мЗв. Общее число рентгенорадиологических диагностических процедур, проведенных в Российской Федерации в 2019 г., составило более 306,5 миллионов, или 2,09 процедуры на одного жителя. Средняя годовая эффективная доза медицинского облучения в расчете на одного жителя России в 2019 г. составила 0,62 мЗв, а на одну процедуру – 0,30 мЗв. В представленных формах № 4-ДОЗ субъектов Российской Федерации за 2019 г. содержатся результаты 9179 измерений мощности дозы гамма-излучения в деревянных домах, 11 307 измерений в малоэтажных каменных домах, 121 323 измерений в многоэтажных каменных домах и 229 342 измерений на открытой местности, результаты 3930 измерений уровней содержания радона в деревянных домах, 5071 измерений в малоэтажных каменных домах и 46 896 измерений в многоэтажных каменных домах, а также результаты 19 444 исследований уровней содержания природных радионуклидов в питьевой воде. Средняя годовая эффективная доза облучения жителей Российской Федерации за счет природных источников, по данным всех измерений за период с 2001 по 2019 г., составила 3,36 мЗв/год. В статье даны Приложения с итоговыми формами Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации за 2019 г., полученными на основе обобщения информации, содержащейся в формах государственного статистического наблюдения № 1-ДОЗ, 3-ДОЗ и 4-ДОЗ субъектов Российской Федерации (полная версия статьи, содержащая Приложения, размещена на сайте журнала [www.radhyg.ru](http://www.radhyg.ru)).*

**Ключевые слова:** годовые эффективные дозы облучения, природное облучение, медицинское облучение, техногенное облучение, персонал, пациенты, население, единая государственная система контроля индивидуальных доз.

**Барковский Анатолий Николаевич**

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

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

**Введение**

Результаты анализа информации о дозах техногенного, медицинского и природного облучения населения публикуются в ежегодных информационных сборниках «Дозы облучения населения Российской Федерации» (далее – Сборник) [1–18]. В настоящей статье приводятся результаты анализа данных ЕСКИД, полученных в 2019 г., по результатам которого подготовлен и издан ежегодный информационный сборник «Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году» (далее – Сборник).

**1. Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующих излучений (форма № 1-ДОЗ)**

Общее число организаций, представивших форму № 1-ДОЗ за 2019 г., составило 19 430, из которых 15 208 (78%) – медицинские учреждения. Необходимо отметить, что при анализе данных учитывались данные, представленные не только радиационными объектами, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, но и радиационными объектами, обслуживаемыми Федеральным медико-биологическим агентством (ФМБА) России. Это позволило значительно увеличить объем получаемых данных и сделать их более представительными. На рисунке 1 представлены данные о численности организаций, представленные которыми формы № 1-ДОЗ использовались для подготовки сборника в различные годы. Как видно из рисунка 1, число таких организаций постоянно увеличивается.

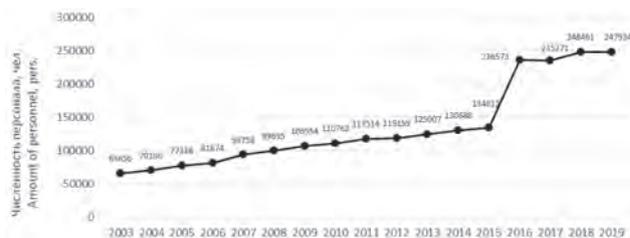


**Рис. 1.** Динамика количества организаций, формы федерального государственного статистического наблюдения № 1-ДОЗ которых использовались при подготовке Сборника за 2003–2019 гг.

**[Fig. 1.** Dynamics of number of organizations submitted form № 1-DOZ in the Federal Data base of Rosпотребнадзор from 2003 to 2019]

Численность персонала организаций, представивших отчеты по форме № 1-ДОЗ за 2019 г. в Федеральный банк данных Роспотребнадзора, составила 158 112 человек, из которых 145 292 человека – персонал группы А и 12 820 – персонал группы Б, дозы облучения которого получены по данным инструментального контроля. С учетом данных о 561 радиационном объекте, обслуживаемом ФМБА России, общая численность персонала, сведения о дозах облучения которого включены в сборник, составляет 247 934 человека, из которых 227 723 человека – персонал группы А и 20 211 – персонал группы Б.

На рисунке 2 представлены данные по динамике численности персонала, данные о котором включены в Сборник за период с 2003 по 2019 г.



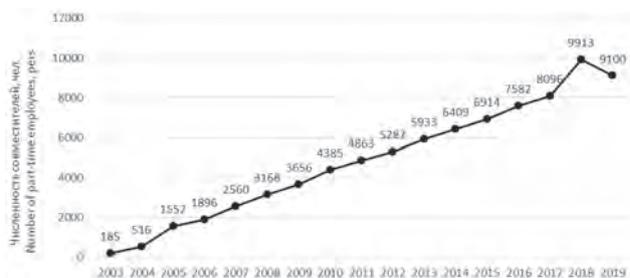
**Рис. 2.** Динамика численности персонала, данные о котором включены в Сборник, с 2003 по 2019 г.

**[Fig. 2.** The amount of personnel, for which the annual individual doses are submitted in Federal Data Base of personnel exposure doses from 2003 to 2019]

Как видно из представленных результатов, по сравнению с данными за 2018 г. численность персонала, включенного в Сборник в 2019 г., несколько уменьшилась (на 527 чел.) за счет сокращения количества организаций, обслуживаемых ФМБА России, представивших форму № 1-ДОЗ за 2019 г. (на 55 организаций).

Фактическая численность персонала, индивидуальные дозы облучения которого отражены в формах № 1-ДОЗ, меньше, поскольку лица, совмещающие свою работу в нескольких организациях, учитываются в этих формах несколько раз. Количество работников, осуществляющих работу с техногенными источниками ионизирующего излучения по совместительству на нескольких радиационных объектах, в 2019 г. составило 9100 человек. Средняя индивидуальная доза в этой группе персонала, с учетом всех мест их работы, составила 2 мЗв/год, что в 1,6 раза превышает среднюю дозу всего персонала группы А Российской Федерации за 2019 г., – 1,19 мЗв.

На рисунке 3 представлены данные о динамике численности персонала, совмещающего работу на нескольких радиационных объектах.



**Рис. 3.** Численность персонала, работающего по совместительству на нескольких радиационных объектах

**[Fig. 3.** The amount of personnel working part-time at several radiation facilities]

Коллективная эффективная доза техногенного облучения персонала, данные о котором включены в Сборник, за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов составила в 2019 г. 284,3 чел.-Зв, из которых 271,3 чел.-Зв приходится на персонал группы А. Это составляет менее 0,03% от коллективной дозы населения Российской Федерации за счет всех источников ионизирующего излучения.

Средняя годовая индивидуальная эффективная доза техногенного облучения персонала в 2019 г. составила

1,19 мЗв для персонала группы А и 0,64 мЗв для персонала группы Б.

Но, к сожалению, эти данные все еще не полностью отражают картину техногенного облучения персонала на территории Российской Федерации. В таблице 1 представлены данные о численности персонала группы А и Б радиационных объектов МО России, МВД России, ФСБ России, ФСИН России, УДП России и Росгвардии, которые не вошли в Сборник. Они отражены в Радиационно-

гигиеническом паспорте Российской Федерации за 2019 г., но по ним не представлены формы № 1-ДОЗ.

Как видно из приведенных данных, в Сборнике все еще не отражены данные о 23 265 сотрудниках, что составляет почти 9% от общего количества персонала. Эту проблему необходимо решать.

Структура индивидуальных доз техногенного облучения персонала группы А в 2019 г. приведена в таблице 2.

Таблица 1

**Данные о персонале радиационных объектов МО России, МВД России, ФСБ России, ФСИН России, УДП России и Росгвардии**

[Table 1

**Data on radiation facilities of the Russian Defense Ministry, Ministry of Internal Affairs of Russia, FSB of Russia, FSIN of Russia, Administrative Directorate of the President of the Russian Federation, VNG of Russia]**

п/п [No.]	Ведомство [Ministry]	Персонал группы А [Amount of A personnel]			Персонал группы Б [Amount of B personnel]		
		Числ. [Amount of personnel]	КД [Collective dose]	СИД [Average indi- vidual dose]	Числ. [Amount of personnel]	КД [Collective dose]	СИД [Average indi- vidual dose]
		чел. [person]	чел.-Зв [manSv/year]	мЗв/чел. [mSv/year]	чел. [person]	чел.-Зв [manSv/year]	мЗв/чел. [mSv/year]
1.	МО России [Russian Defense Ministry]	14 238	18,3*	1,294*	3 905	-	-
2.	МВД России [Ministry of Internal Affairs of Russia]	1 060	0,78	0,74	96	0,063	0,65
3.	ФСБ России [FSB of Russia]	1 391	1,11	0,79	203	0,061	0,30
4.	ФСИН России [FSIN of Russia]	1 364	0,97	0,71	9	0,0046	0,21
5.	УДП России [Administrative Directorate of the President of the Russian Federation]	697	0,94	1,35	115	0,17	1,49
6.	ВНГ России [VNG of Russia]	179	0,20	1,10	8	-	-
7.	ВСЕГО [Total]	18 929	22,3	1,18	4 336	0,30	0,69

\*- представлены только суммарные данные для персонала группы А и группы Б.

[\* - total data for the personnel of groups A and B are provided]

Таблица 2

**Структура индивидуальных доз персонала группы А и группы Б в 2019 г. по численности и в процентном отношении**

[Table 2

**The structure of individual doses of the group A and group B personnel by number and percentage in 2019]**

Диапазон доз, мЗв [Dose range, mSv]	Персонал группы А [Amount of A personnel]		Персонал группы Б [Amount of B personnel]	
	чел. [person]	%	чел. [person]	%
0-1	140 686	61,8	15 331	75,9
1-2	61 265	26,9	4 370	21,6
2-5	18 628	8,2	494	2,4
5-12,5	5 972	2,6	15	0,07
12,5-20	1 165	0,5	1	0,005
20-50	7	0,003	-	-
Всего [Total]	227 723		20 211	

Более подробные сведения о дозах облучения персонала радиационных объектов приведены в обобщенной форме № 1-ДОЗ Российской Федерации за 2019 г., представленной в Приложении 1 (опубликовано на сайте radhyg.ru).

2. Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований (форма № 3-ДОЗ)

При составлении Сборника учтены данные форм № 3-ДОЗ, представленных 15 140 медицинскими учреждениями, в том числе 242 медицинскими учреждениями, обслуживаемыми ФМБА России, 308 медицинскими учреждениями МО России, 114 медицинскими учреждениями МВД России, 67 медицинскими учреждениями ФСИН России, 24 медицинскими учреждениями УДП России, 131 медицинским учреждением ФСБ России и 30 медицинскими учреждениями Росгвардии. Суммарное количество диагностических рентгенорадиологических процедур, проведенных в медицинских учреждениях Российской Федерации в 2019 г., составило 306,5 млн, в том числе 6,33 млн в медицинских учреждениях, обслуживаемых ФМБА России, 3,76 млн в медицинских учреждениях МО России, 2,92 млн в медицинских учреждениях МВД России, 2,03 млн в медицинских учреждениях ФСИН России, 0,74 млн в медицинских учреждениях УДП России, 1,07 млн в медицинских учреждениях ФСБ России и 0,25 млн в ме-

дицинских учреждениях Росгвардии. Коллективная доза медицинского облучения составила 90,7 тыс. чел.-Зв.

В таблице 3 представлены данные по изменению процента измеренных доз медицинского облучения при проведении рентгенодиагностических процедур за период с 2011 по 2019 г. Как видно, процент измеренных доз из года в год возрастает. Тем не менее, более 24% доз медицинского облучения пациентов все еще оцениваются расчетными методами. И хотя средние значения расчетных и измеренных доз в настоящее время близки (табл. 4), что объясняется тем, что в качестве табулированных значений расчетных доз принимаются средние измеренные дозы за предшествующий год, но использование расчетных доз снижает достоверность получаемых результатов и нивелирует реальные изменения этих величин.

На рисунке 4 представлена динамика количества проведенных рентгенорадиологических процедур, а на рисунке 5 – динамика коллективной дозы медицинского облучения за период с 2015 по 2019 г. Как видно, количество рентгенорадиологических процедур по сравнению с 2018 г. увеличилось на 5,6%, а коллективная доза медицинского облучения – на 7,2%. Это является следствием развития рентгенодиагностики и широкого внедрения в последние годы компьютерной томографии – высокоинформативного, но и высокодозного метода рентгенодиагностики.

Таблица 3

**Изменение процента измеренных доз медицинского облучения при проведении рентгенодиагностических процедур**

[Table 3]

**Change in the percentage of measured doses of medical exposure during x-ray examinations]**

Год [Year]	Процент измеренных доз медицинского облучения [Percentage of measured doses of medical exposure]
2011	53,7
2012	60,7
2013	64,4
2014	68,4
2015	72,6
2016	72,9
2017	73,0
2018	74,3
2019	75,7

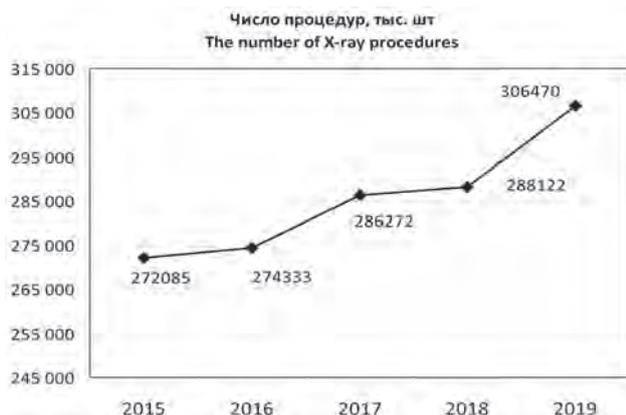
Таблица 4

**Средние значения эффективных доз для различных рентгенодиагностических процедур, полученные по результатам измерений, и табулированные расчетные значения**

[Table 4]

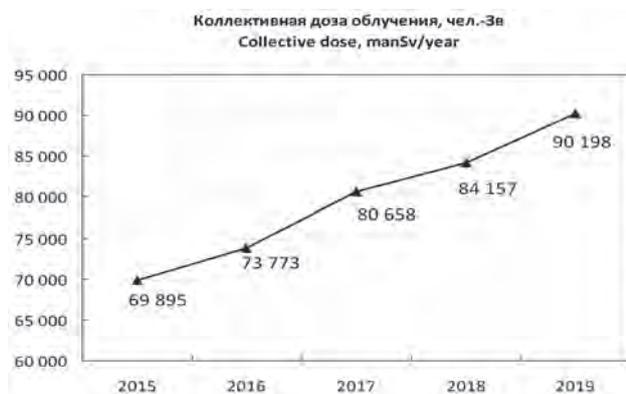
**Average values of effective doses for various x-ray examinations obtained from measurements, and tabulated calculated values]**

Средняя индивидуальная доза, мЗв/год [Average individual dose, mSv/year]	Флюорография пленочная [Film fluorography]	Флюорография цифровая [Digital fluorography]	Рентгенография пленочная [Film radiography]	Рентгенография цифровая [Digital radiography]	Рентгеноскопия [Radioscopy]	Компьютерная томография [Computer tomography]	Специальные исследования [Special examinations]	Прочие [Other]	В среднем [Average]
Расчетная [Mesured]	0,39	0,05	0,14	0,03	2,8	3,8	3,3	0,31	0,21
Измеренная [Calculated]	0,30	0,05	0,13	0,04	2,6	3,7	3,8	1,7	0,31



**Рис. 4.** Количество рентгенорадиологических процедур в период с 2015 по 2019 г.

[Fig. 4. Amount of X-ray examinations, for which the data are submitted in the Federal Data Base of medical exposure doses in the period from 2015 to 2019]



**Рис. 5.** Коллективная доза медицинского облучения за счет рентгенорадиологических процедур в период с 2015 по 2019 г.

[Fig. 5. Collective dose of medical exposure due to X-ray procedures for which the data are submitted in the Federal Data Base of medical exposure doses in the period from 2015 to 2019]

Количество проведенных компьютерных томографий по сравнению с 2018 г. возросло на 15,5%, а по сравнению с 2015 г. – на 71,5%. Доза за счет компьютерной томографии в 2019 г. составила 56,6% от всей дозы медицинского облучения населения Российской Федерации, при том

что количество компьютерных томографий составило всего 4,5%.

С ростом числа компьютерных томографий связан и рост средних доз медицинского облучения в расчете на одну процедуру и особенно в расчете на одного жителя. В таблице 5 представлены данные по динамике средних доз медицинского облучения за период 2015–2019 гг.

За период с 2015 по 2019 г. наблюдался рост числа рентгенографических и флюорографических исследований при постоянном снижении средних доз облучения за счет данных видов исследований, связанным с внедрением цифровой техники и постепенным вытеснением старого оборудования. Это замедлило рост средних доз в расчете на процедуру по сравнению со средней дозой на жителя. Но при дальнейшем развитии рентгенодиагностики и ПЭТ-/КТ-диагностики неизбежен рост средних и коллективных доз медицинского облучения населения. Важно не допустить необоснованного роста доз медицинского облучения.

Более подробная информация о медицинском облучении населения Российской Федерации приведена в форме № 3-ДОЗ Российской Федерации, представленной в Приложении 2 (опубликовано на сайте radhyg.ru).

3. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (форма №4-ДОЗ). Всего в Российской Федерации в 2019 г. было проведено 141 809 измерений мощности амбиентной дозы (МАД) гамма-излучения в жилых и общественных зданиях различных типов, из которых 9179 измерений МАД гамма-излучения было проведено в деревянных домах (Д), 11 307 измерений МАД в малоэтажных каменных домах (1К), 121 323 измерения МАД в многоэтажных каменных домах (МК) и 229 342 измерения на открытой местности на территории населенных пунктов.

Диапазон средних по регионам значений МАД гамма-излучения на открытой местности на территории населенных пунктов в 2019 г. составил 0,05–0,17 мкЗв/ч, в деревянных зданиях – 0,04–0,14 мкЗв/ч, в каменных малоэтажных и многоэтажных зданиях – 0,07–0,18 мкЗв/ч и 0,04–0,27 мкЗв/ч соответственно.

Значения средних годовых эффективных доз внешнего терригенного облучения жителей субъектов федерации лежат в диапазоне от 0,31 мЗв/год (Кировская область) до 1,13 мЗв/год (Кабардино-Балкарская Республика).

Таблица 5

**Средние годовые эффективные дозы медицинского облучения в расчете на одного жителя и на одну рентгенорадиологическую процедуру, мЗв/год**

[Table 5

**Average annual effective doses of medical exposure per inhabitant and for one X-ray examination, mSv/year]**

Год [Year]	2015	2016	2017	2018	2019
СИД*, мЗв на жителя [AAED*, mSv per inhabitant]	0,47	0,49	0,55	0,57	0,62
СИД, мЗв на процедуру [AAED*, mSv per examination]	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30

\* – средняя годовая эффективная доза медицинского облучения  
[\* – average annual effective doses of medical exposure]

В 2019 г. на территории Российской Федерации было проведено 55 897 измерений уровней содержания радона в жилых и общественных зданиях различных типов, из которых 3930 измерений выполнено в деревянных зданиях, 5071 измерение – в малоэтажных каменных домах, 46 896 измерений – в многоэтажных каменных домах.

Средние по регионам значения измерений ЭРОА изотопов радона за 2019 г. находятся в диапазоне: 5–293 Бк/м<sup>3</sup> – для деревянных домов; 5–211 Бк/м<sup>3</sup>– для одноэтажных каменных домов; 4–114 Бк/м<sup>3</sup>– для многоэтажных каменных домов. Значения средних годовых эффективных доз внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона и их короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) жителей субъектов Российской Федерации лежат в диапазоне от 0,40 мЗв/год (Ямало-Ненецкий автономный округ) до 9,40 мЗв/год (Забайкальский край).

Разделение субъектов Российской Федерации на регионы с «низкими» и «высокими» показателями уровней внутреннего облучения населения за счет ингаляции изотопов радона и их ДПР является более заметным, чем при анализе значений мощности дозы гамма-излучения, из-за большей вариабельности значений ЭРОА изотопов радона в зданиях. Для отдельных жителей регионов или целых населенных пунктов эта вариабельность достигает иногда нескольких порядков.

По измерениям 2019 г. на территории России значения ЭРОА изотопов радона в домах отдельных групп населения, а также в отдельных зданиях общественного назначения значительно превысили как средние по регионам значения, так и установленные гигиенические нормативы по содержанию радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Группы населения с высокими дозами внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона и их ДПР выявлены в 2019 г. на территории Республик Алтай, Саха (Якутия) и Тыва, Иркутской, Тульской и Оренбургской областей, Забайкальского края. В таблице 6 приведены данные о содержании радона в воздухе помещений некоторых представителей таких групп населения.

Как видно из таблицы 6, приведенные данные значительно превышают гигиенические нормативы по содержанию радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, но механизм оперативного решения данной проблемы в настоящее время отсутствует. С учетом достаточно широких масштабов данного явления и высоких доз облучения жителей, значительно превышающих максимальные дозы техногенного облучения персонала радиационных объектов, для эффективного и комплексного решения данной проблемы необходимо создание специальной федеральной целевой программы.

Таблица 6

**Данные о выявленных в 2019 г. случаях существенных превышений гигиенического норматива по ЭРОА радона в жилых домах**

[Table 6

**Data on the cases of significant exceedance of the hygienic norm on radon equivalent equilibrium volume activity in residential houses, revealed in 2019]**

Субъект РФ [Constituent entity of the RF]	Тип здания [building type]	Макс ЭРОА радона, Бк/м <sup>3</sup> [Max radon equivalent equilibrium volume activity, Bq/m <sup>3</sup> ]
Иркутская область [Irkutsk region]	Многоэтажное каменное [Multi-storey, stone]	929
Забайкальский край [Zabaikalskiy Krai]	Деревянное [Wooden]	1970
Тульская область [Tula Region]	Одноэтажное каменное [One-storey, stone]	506
Оренбургская область [Orenburg Region]	Деревянное [Wooden]	610
	Одноэтажное каменное [One-storey, stone]	1242
	Деревянное [Wooden]	1196
Республика Саха (Якутия) [Sakha Republic (Yakutia)]	Одноэтажное каменное [One-storey, stone]	631
	Многоэтажное каменное [Multi-storey, stone]	7364
	Деревянное [Wooden]	709
Республика Алтай [Altai Republic]	Одноэтажное каменное [One-storey, stone]	729
	Многоэтажное каменное [Multi-storey, stone]	2198
Республика Тыва [Tuva Republic]	Многоэтажное каменное [Multi-storey, stone]	594

В 2019 г. на территории Российской Федерации было проведено 19 444 исследования уровней содержания природных радионуклидов (ПРН) в питьевой воде (табл. 7), которые выявили ряд проблем.

Таблица 7

**Информация о проведенных в 2019 г. исследованиях питьевой воды**

[Table 7]

**Information on drinking water research carried out in 2017**

Радионуклид [Radionuclide]	Количество исследований [Number of studies]	Диапазон удельной активности, мБк/кг [Specific activity range, mBq / kg]
<sup>226</sup> Ra	918	0,1–256,8
<sup>228</sup> Ra	846	0,1–200,0
<sup>210</sup> Pb	855	0,1–82,0
<sup>210</sup> Po	944	0,1–32,8
<sup>238</sup> U+ <sup>234</sup> U	709	0,9–1820,0
<sup>222</sup> Rn	15172	1000,0–114 270,4

Даже среднее по региону значение удельной активности <sup>222</sup>Rn в питьевой воде Челябинской области составляет 114 Бк/кг, почти в два раза превышая уровень вмешательства, – 60 Бк/кг. Средняя удельная активность <sup>222</sup>Rn в воде подземных источников питьевого водоснабжения Пластовского района Челябинской области составляет 134 Бк/кг, г. Челябинска – 113 Бк/кг. Средний по Ленинградской области показатель содержания <sup>222</sup>Rn в питьевой воде составляет 77 Бк/кг, Магаданской области – 82 Бк/кг, также превышая установленный уровень вмешательства.

Средние дозы внутреннего облучения за счет потребления питьевой воды в 2019 г., превышающие 0,1 мЗв, по данным ЕСКИД, получены для жителей Воронежской (0,148 мЗв/год), Курской (0,147 мЗв/год), Белгородской (0,113 мЗв/год), Челябинской (0,107 мЗв/год) областей и города Москвы (0,101 мЗв/год).

Средние по субъектам Российской Федерации индивидуальные эффективные годовые дозы облучения населения за счет всех природных ИИИ за 2019 г. лежат в диапазоне от 1,45 мЗв/год (Ямало-Ненецкий автономный округ) до 11,13 мЗв/год (Забайкальский край).

Для жителей 8 субъектов Российской Федерации (Республика Адыгея, Бурятия, Северная Осетия (Алания), Хакасия, Кемеровская область, Курганская область, Ленинградская область и Еврейская автономная область) средние годовые эффективные дозы природного облучения в 2019 г. находятся в диапазоне 4,5–5,0 мЗв/год; в 9 регионах (Республики Алтай, Башкортостан, Саха (Якутия), Тыва и Карачаево-Черкесская, Ивановская, Оренбургская и Тульская области, Ставропольский край), по данным измерений 2019 г., значения средних годовых эффективных доз природного облучения жителей являются повышенными (свыше 5 до 10 мЗв/год), причем средняя доза природного облучения на одного жителя Республики Саха (Якутия) составляет 9,99 мЗв/год. В одном регионе Российской Федерации (Забайкальском крае) средняя доза природного облучения жителей по измерениям 2019 г. превысила 10 мЗв/год (составила 11,13 мЗв/год) и в соответствии с ОСПОРБ 99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10 характеризует высокую степень облучения населения за счет природных ИИИ. Во всех приведенных случаях повы-

шенные и высокие средние значения годовой дозы природного облучения жителей обусловлены высокими уровнями содержания изотопов радона в воздухе помещений.

Средняя доза природного облучения населения Российской Федерации, оцененная по всей совокупности имеющихся данных за 2001–2019 гг., составляет 3,36 мЗв/год. В структуре данной дозы более 59% приходится на долю дозы внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона и их ДПР (2,0 мЗв/год), около 20% – на долю внешнего терригенного облучения (0,67 мЗв/год), чуть более 10% вносит компонента космического излучения (0,339 мЗв/год), около 5% – внутреннее облучение за счет <sup>40</sup>K (0,17 мЗв/год). Доля дозы внутреннего облучения за счет содержания природных радионуклидов в пищевой продукции и питьевой воды составляет около 5% (0,171 мЗв/год). Наименьший вклад в суммарную дозу облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения (менее 0,2%) вносит доза облучения за счет ингаляции долгоживущих природных радионуклидов с атмосферным воздухом (0,006 мЗв/год).

В Приложении 3 представлена обобщенная Форма № 4-ДОЗ Российской Федерации за 2019 г. (опубликована на сайте radhyg.ru)

#### Литература

1. Рамзаев П.В., Барковский А.Н., Барышков Н.К., и др. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 1999 году: справочник. СПб, 2001. 29 с.
2. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Брук Г.Я., и др. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 2002 году: справочник. СПб, 2004. 61 с.
3. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения у населения Российской Федерации в 2003 году: справочник. СПб, 2004. 59 с.
4. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 2004 году: справочник. СПб, 2005. 61 с.
5. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Горский А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2005 году: справочник. СПб, 2006. 39 с.
6. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Голиков В.Ю. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2006 году: справочник. СПб, 2007. 61 с.
7. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2007 году: информационный сборник. СПб, 2008. 66 с.
8. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2008 году: информационный сборник. СПб, 2009. 69 с.
9. Барышков Н.К., Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2009 году: информационный сборник. СПб, 2010. 67 с.
10. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2010 году: информационный сборник. СПб, 2011. 62 с.
11. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2011 году: информационный сборник. СПб, 2012. 63 с.
12. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2012 году: информационный сборник. СПб, 2013. 67 с.
13. Репин В.С., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2013 году: информационный сборник. СПб, 2014. 60 с.

14. Репин В.С., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002 – 2015 гг.: информационный сборник. СПб, 2015. 40 с.
15. Барковский А.Н., Н.К. Барышков, А.А. Братилова, и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информационный сборник. СПб, 2016. 72 с.
16. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб, 2017. 78 с.
17. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информационный сборник. СПб, 2018. 69 с.
18. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб, 2019. 71 с.

Поступила: 20.11.2020 г.

**Барковский Анатолий Николаевич** – главный научный сотрудник, руководитель Федерального радиологического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

**Ахматдинов Руслан Расимович** – младший научный сотрудник Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

**Библин Артем Михайлович** – старший научный сотрудник, руководитель Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Братилова Анжелика Анатольевна** – научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Журавлева Валентина Егоровна** – инженер Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Кормановская Татьяна Анатольевна** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Кувшинников Сергей Иванович** – врач по радиационной гигиене лаборатории радиационного контроля и физических факторов Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

**Сивенков Александр Геннадьевич** – инженер Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Тутельян Ольга Евгеньевна** – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационного контроля и физических факторов отдела лабораторного дела Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

**Цовьянов Александр Георгиевич** – заведующий лабораторией Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

**Для цитирования:** Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Братилова А.А., Журавлева В.Е., Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., Сивенков А.Г., Тутельян О.Е., Цовьянов А.Г. Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2019 г. // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 110-119. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-110-119

## The outcomes of functioning of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens based on the 2019 data

Anatoly N. Barkovsky<sup>1</sup>, Ruslan R. Akhmatdinov<sup>1</sup>, Rustam R. Akhmatdinov<sup>1</sup>, Artem M. Biblin<sup>1</sup>, Anzhelika A. Bratilova<sup>1</sup>, Valentina E. Zhuravleva<sup>2</sup>, Tatyana A. Kormanovskaya<sup>1</sup>, Sergey I. Kuvshinnikov<sup>3</sup>, Aleksandr G. Sivenkov<sup>2</sup>, Olga E. Tutelyan<sup>3</sup>, Aleksandr G. Tsovyanov<sup>2</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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

*The article presents results of the analysis of information on the doses of technogenic exposure of personnel and the population due to the normal operation of radiation facilities, exposure of the population due to natural sources and technogenically altered radiation environment, and medical exposure of patients. The data were obtained using the Unified System of Individual Dose Control of the RF citizens for 2019. The analysis was carried out on the basis of the data contained in the forms of state statistical observation No. 1-DOZ (personnel individual doses), No. 2-DOZ (emergency doses), No. 3-DOZ (patients' exposure doses) and No. 4-DOZ (population exposure doses from natural and technogenically impacted background) for 2019 submitted by the organizations and territories, the state sanitary and epidemiological supervision of which was carried out by Rosпотребнадзор and FMBA of Russia. The article used data obtained within the framework of Radiation-Hygiene passportization. In 2019, 18430 organizations dealing with technogenic sources of ionizing radiation submitted forms No. 1-DOZ with the information on the doses to personnel with a total number of 247934 people, of which 227723 people belonged to the personnel group A and 20211 person to the personnel group B. For these groups, the doses were assessed based on results of individual dosimetric control. In 2019, according to the Unified System of Individual Dose Control data, the average individual annual effective dose of technogenic exposure to the personnel group A was 1.19 mSv, and for the personnel group B it was 0.64 mSv. The total number of X-ray and radiological diagnostic procedures performed in the Russian Federation in 2019 exceeded 306.5 million, or 2.09 procedures per a citizen. The average annual effective dose of medical radiation exposure per one resident of Russia in 2019 was 0.62 mSv, and per procedure – 0.31 mSv. The submitted forms No. 4-DOZ of the constituent entities of the Russian Federation for 2019 contained results of the measurements of dose rate of gamma radiation in 9179 wooden houses, 11,307 measurements in low-rise stone houses, 121323 measurements in multi-storey stone houses and 229342 measurements in open areas. These also contained results of 3930 measurements of radon levels in wooden houses, 5071 measurements in low-rise stone houses and 46896 measurements in multi-storey stone houses, as well as the results of 19444 analyses of the levels of natural radionuclides in drinking water. The average annual effective dose of radiation to residents of the Russian Federation from natural sources, according to all measurements for the period from 2001 to 2019, was 3.36 mSv. The article provides Appendices with the final forms of Unified System of Individual Dose Control for the Russian Federation for 2019. Data for the forms have been obtained on the basis of summarizing the information contained in the forms of state statistical observation No. 1-DOZ, 3-DOZ and 4-DOZ of the constituent entities of the Russian Federation.*

**Key words:** annual effective radiation doses, natural exposure, medical exposure, technogenic exposure, personnel, patients, population, the Unified System of Individual Dose Control.

### References

1. Ramzaev PV, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bruk GYa, Titova TN. Guide: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 1999. Saint-Petersburg, 2001. 29 p. (In Russian)
2. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bruk GYa, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, et al. Guide: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2002. Saint-Petersburg, 2004. 61 p. (In Russian)
3. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Perminova GS, et al. Guide: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2003. Saint-Petersburg, 2004. 59 p. (In Russian)
4. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Perminova GS, et al. Guide: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2004. Saint-Petersburg, 2005. 61 p. (In Russian)
5. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Gorsky AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, et al. Guide: Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2005. Saint-Petersburg, 2005. 61 p. (In Russian)

### Anatoly N. Barkovsky

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

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

- Russian Federation in 2005. Saint-Petersburg, 2006. 39 p. (In Russian)
6. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Golikov VyU, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Repin VS, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2006. Saint-Petersburg, 2007. 61 p. (In Russian)
  7. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2007. Saint-Petersburg, 2008. 66 p. (In Russian)
  8. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2008. Saint-Petersburg, 2009. 69 p. (In Russian)
  9. Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, Perminova GS, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2009. Saint-Petersburg, 2010. 67 p. (In Russian)
  10. Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2010. Saint-Petersburg, 2011. 62 p. (In Russian)
  11. Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2011. Saint-Petersburg, 2012. 63 p. (In Russian)
  12. Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2012. Saint-Petersburg, 2013. 67 p. (In Russian)
  13. Repin VS, Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Matyukhin SV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2013. Saint-Petersburg, 2014. 60 p. (In Russian)
  14. Repin VS, Baryshkov NK, Bratilova AA, Varfolomeeva KV, Goncharova YuN, Kononenko DV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation according to the results of the USIDC in 2002-2015. Saint-Petersburg, 2015. 40 p. (In Russian)
  15. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Repin LV, Romanovich IK, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2015. Saint-Petersburg, 2016. 72 p. (In Russian)
  16. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Bruk GYa, Vorobyev BF, Kormanovskaya TA, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2016. Saint-Petersburg, 2017. 78 p. (In Russian)
  17. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2016. Saint-Petersburg, 2018. 69 p. (In Russian)
  18. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2016. Saint-Petersburg, 2019. 71 p. (In Russian)

Received: November 20, 2020

**For correspondence: Anatoly N. Barkovsky** – The head of 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 Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru)

**Ruslan R. Akhmatdinov** – Junior research fellow, Information-analytical center of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P. V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Rustam R. Akhmatdinov** – Leading research engineer, Information-analytical center of the Saint-Petersburg Institute of Radiation Hygiene after P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Artem M. Biblin** – Information Analytical Center Head, 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

**Anzhelika A. Bratilova** – Research fellow of Internal radiation laboratory of 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

**Valentina E. Zhuravleva** – Engineer, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

**Tatyana A. Kormanovskaya** – Candidate of Biological Sciences, Senior Research Scientist, natural sources dosimetry laboratory of 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

**Sergey I. Kuvshinnikov** – Radiation Control and Physical Factors Laboratory physicist expert, Laboratory Studies Department of Federal Hygiene and Epidemiology Center of Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

**Aleksandr G. Sivenkov** – Engineer, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

**Olga E. Tutelyan** – Candidate of Medical Sciences, Radiation Control and Physical Factors Laboratory Head, Federal Hygiene and Epidemiology Center Laboratory Studies, Moscow, Russia

**Aleksandr G. Tsovyanov** – Laboratory Head, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

**For citation: Barkovsky A.N., Akhmatdinov R.R., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Bratilova A.A., Zhuravleva V.E., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Sivenkov A.G., Tutelyan O.E., Tsovyanov A.G. The outcomes of functioning of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens based on the 2019 data. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13 No. 4. P. 110-119. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-110-119**

## Том 13 № 1, 2020

## НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Иванов С.А., Библин А.М., Репин В.С., Варфоломеева К.В.

**О четвертой комплексной научной экспедиции по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана**.....6

Аклеев А.В., Дегтева М.О., Крестинина Л.Ю.

**Сравнительный анализ медико-дозиметрических последствий аварии 1957 года и загрязнения реки Течи в контексте эффективности защитных мероприятий**..... 16

Голиков В.Ю.

**Дозиметрия внешнего облучения населения: сравнение аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1** ..... 27

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**.....38

Камышанская И.Г., Черемисин В.М., Водоватов А.В., Борискина А.Н.

**Результаты клинической апробации низкодозовых протоколов проведения цифровой линейной томографии органов грудной клетки**.....47

Сабурова А.С., Филимонова М.В., Южаков В.В., Шевченко Л.И., Яковлева Н.Д., Бандурко Л.Н., Корецкая А.Е., Фомина Н.К., Сабуров В.О., Филимонов А.С.

**Влияния ингибитора синтаз оксида азота T1023 на развитие лучевого пневмофиброза у крыс**.....60

## САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Мирсаидов У.М., Назаров Х.М., Шосафарова Ш.Г., Махмудова М.М.

**Радоновый мониторинг на территории северного Таджикистана** .....68

## РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

Медников И.В., Васильев В.В., Бусыгин А.С., Собко А.А.

**Обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации тяжеловодного исследовательского ядерного реактора НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ**..... 74

## ИЗ ИСТОРИИ ГИГИЕНЫ

Панин В.Ф., Чередникова В.И.

**Профессор Федор Григорьевич Кротков – главный гигиенист Красной Армии**.....84

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Шалагинов С.А., Крестинина Л.Ю.

**Уральская когорта населения, облученного в детском возрасте** .....91

## МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Сакович В.А.

**К вопросу о методологии количественной оценки радиационного риска**.....94

## РЕЦЕНЗИИ

Балтрукова Т.Б.

**Рецензия на монографию «Научные основы радиационной защиты в современной медицине» Том 1 «Лучевая диагностика»** ..... 102

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

**«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»** ..... 105

## Том 13 № 2, 2020

## НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Марченко Т.А., Радин А.И., Раздайводин А.Н.

**Ретроспективное и современное состояние лесных территорий приграничных районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению**.....6

Кузнецов В.К., Панов А.В., Санжарова Н.И., Исамов Н.Н., Андреева Н.В., Гешель И.В., Сидорова Е.В.

**Анализ результатов радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Курской АЭС** ..... 19

Голиков В.Ю.

**Верификация модели внешнего облучения населения Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1»** .....31

Крышев А.И., Сазыкина Т.Г., Павлова Н.Н.

**Вопросы нормирования поступления <sup>238</sup>U в поверхностные воды с учетом его радиационного и токсического действия** .....41

Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Назаров Е.И., Жуковский М.В.

**Сравнительный анализ накопления радона в зданиях различного класса энергоэффективности на примере пяти российских городов**.....47

Рыжакова Н.К., Ставицкая К.О., Удалов А.А.

**Новый подход к проблеме оценки радоноопасности участков застройки** .....57

Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бежашева Т.А., Иванов С.А., Салазкина Н.В., Ступина В.В., Кадука А.Н.

**Содержание <sup>210</sup>Po и <sup>210</sup>Pb в некоторых видах пищевых продуктов. Оптимизация метода определения** .....65

Соснина С.Ф., Юркин А.М., Окатенко П.В., Рогачева С.А., Груздева Е.А., Сокольников М.Э.

**Лейкомогенный риск и темп накопления дозы радиационного воздействия. Сообщение 2: Сравнительный анализ лейкоцитарных индексов и динамики показателей периферической крови в зависимости от дозы внешнего гамма-облучения**..... 75

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

**О возможности сравнения среднегодовых эффективных доз облучения медицинского персонала России и некоторых зарубежных стран** .....89

Сафронов В.В., Давыдов А.А., Водоватов А.В., Старцева О.И., Библин А.М., Репин Л.В.

**Оценка медицинских радиационных и нерадиационных рисков на примере пациентов, проходящих хирургическую смену пола с женского на мужской**.....99

## САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Кормановская Т.А., Романович И.К.

**Предложения по совершенствованию нормирования природных минеральных вод по показателям радиационной безопасности** ..... 114

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.

**Метод идентификации участков целинных почв с помощью портативного гамма-спектрометра-дозиметра** ..... 123

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

**«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»** ..... 129

Том 13 № 3, 2020

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., Епифанова С.Б., Аклев А.В.  
**Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017** ..... 6

Жунтова Г.В., Азизова Т.В., Банникова М.В., Заварухина Т.П.  
**Динамика показателей заболеваемости раком толстого кишечника в когорте работников, подвергшихся профессиональному облучению** ..... 18

Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В., Никитин А.Н.  
**Оценка современных уровней <sup>241</sup>Am и <sup>137</sup>Cs в почве, продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси)** ..... 25

Панов А.В., Трапезников А.В., Исамов Н.Н., Коржавин А.В., Кузнецов В.К., Гешель И.В.  
**Оценка влияния эксплуатации реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания района Белоярской АЭС** ..... 38

Маренный А.М., Кононенко Д.В., Труфанова А.Е.  
**Радоновое обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариативности объемной активности радона** ..... 51

Яковлев В.А., Брук Г.Я.  
**Новые методические приемы оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС** ..... 68

Сарычева С.С.  
**Оценка дозовых параметров, определяющих вероятность возникновения детерминированных эффектов в коже пациентов, подвергающихся интервенционным рентгенологическим исследованиям** ..... 77

**САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР**

Кормановская Т.А., Романович И.К., Сапрыкин, К.А., Вяльцина Н.Е., Гаевой С.В., Коновалов В.Ю., Бондарь Л.В.  
**Обеспечение радиационной безопасности населения восточных районов Оренбургской области при использовании питьевой воды из подземных источников водоснабжения** ..... 87

**ОБЗОРЫ**

Звонова И.А.  
**Дозы внутреннего облучения у населения префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима-Дайчи** ..... 98

Кальницкий С.А., Ладанова Е.Р.  
**Риск, уровни облучения и меры радиационной защиты молочной железы у женщин при проведении рентгенографических процедур** ..... 110

**ДИСКУССИИ**

Калинина М.В., Жукова Т.В.  
**Методические аспекты обоснования контрольных диагностических уровней облучения пациентов при медицинских рентгенодиагностических исследованиях** ..... 123

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

Стёпкин Ю.И., Чубирко М.И., Кузмичев М.К., Клепиков О.В., Епринцев С.А.  
**Обзор радиационных инцидентов на территории Воронежской области** ..... 131

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»** ..... 136

Том 13 № 4, 2020

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Чипига Л.А., Петрова А.Е., Водоватов А.В., Станжевский А.А., Лумпов А.А., Лаврешов Д.Д., Наурызбаева Л.Е., Кушнаренко С.М., Мосунов А.А.  
**Определение органных доз внутреннего облучения пациентов при радионуклидной терапии <sup>223</sup>Ra-дихлоридом** ..... 6

Шалагинов С.А., Аклев А.В.  
**Подходы к оценке полноты и качества регистров потомков облученного населения** ..... 17

Власов О.К., Звонова И.А., Краевский П., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А.  
**Реконструкция параметров радиэкологической модели по результатам мониторинга радиационной обстановки в Мазовии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Варшавского» сценария проекта МАГАТЭ EMRAS)** ..... 26

Панфилова В.В., Колганова О.И., Чибисова О.Ф., Жаворонков Л.П.  
**Специфика формирования родительских групп животных при определении влияния малых доз радиации на когнитивные функции потомства** ..... 34

**ОБЗОРЫ**

Павлов А.Н., Чиж Т.В., Снегирев А.С., Санжарова Н.И., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю., Ипатова В.С., Дорн Ю.А.  
**Технологический процесс радиационной обработки пищевой продукции и дозиметрическое обеспечение** ..... 40

Омельчук В.В.  
**Радиационно-гигиеническая характеристика глобальных выпадений радионуклидов в арктических регионах России (по данным НИИ радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева)** ..... 51

**САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР**

Симонова В.Г., Бубликова Л.И.  
**Ретроспективный анализ радиационной обстановки на территории Орловской области** ..... 67

**РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Репин В.С.  
**Исследование возможности использования искусственной нейронной сети для распознавания и оценки вклада отдельных радионуклидов в суммарный бета-спектр** ..... 74

Киселев С.М., Маренный А.М., Старинский В.Г., Бельских Ю.С., Шлыгин В.В., Коренков И.П., Нефёдов Н.А., Маренный М.А.  
**Оценка качества измерений объемной активности радона в воздухе помещений. Результаты международных сличительных испытаний** ..... 82

Арефьева Д.В., Фирсанов В.Б., Куруч Д.Д., Брюхов Р.Е., Тарита В.А.  
**Градуировка сцинтилляционного спектрометра гамма-излучений с применением метода математического моделирования** ..... 93

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

Рамзаев В.П., Бернхардссон К., Дворник А.А., Бакарикова Ж.В., Карлберг О., Водоватов А.В., Йонссон М., Некрасов В.А.  
**Результаты международных сличительных испытаний по определению удельной активности <sup>137</sup>Cs в пробах почвы** ..... 101

**ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ**

Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р., Библин А.М., Братилова А.А., Журавлева В.Е., Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., Сивенков А.Г., Тутельян О.Е., Цовьянов А.Г.  
**Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2019 г.** ..... 110

**ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ ЗА 2020 ГОД** ..... 120

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»** ..... 124

## Vol. 13 № 1, 2020

## RESEARCH ARTICLES

*Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Ivanov S.A., Biblin A.M., Repin V.S., Varfolomeeva K.V.*  
**Results of the fourth combined scientific expedition for the radion monitoring in the Kurily–Kamchatka region of the Pacific ocean.....** 14

*Akleyev A.V., Degteva M.O., Krestinina L.Yu.*  
**Comparative analysis of medical and dosimetric consequences of the 1957 accident and contamination of the Techa river from the perspective of protective measures efficiency .....**25

*Golikov V.Yu.*  
**Dosimetry of external population exposure: a comparison of the Chernobyl and Fukushima accidents .....**36

*Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.*  
**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.....**45

*Kamyshanskaya I.G., Cheremisin V.M., Vodovatov A.V., Boriskina A.N.*  
**Results of the clinical evaluation of the low-dose protocols of the digital linear tomography of the chest.....**58

*Saburova A.S., Filimonova M.V., Yuzhakov V.V., Shevchenko L.I., Yakovleva N.D., Bandurko L.N., Koretskaya A.E., Fomina N.K., Saburov V.O., Filimonov A.S.*

**The influence of nitric oxide synthases inhibitor T1023 on the development of radiation pneumofibrosis in rats....**66

## SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

*Mirsaidov U.M., Nazarov Kh.M., Shosafarova Sh.G., Mahmudova M.M.*  
**Radon monitoring on the territory of Northern Tajikistan.....**72

## RADIATION SAFETY FOR THE DECOMMISSIONING OF THE NUCLEAR LEGACY FACILITIES

*Mednikov I.V., Vasilyev V.V., Busygin A.S., Sobko A.A.*  
**Provision of the radiation safety for the decommissioning of the heavy-water research nuclear reactor NRC «Kurchatov Institute» – ITEP.....**82

## FROM HYGIENE HISTORY

*Panin V.F., Cherednikova V.I.*  
**Professor Fedor Grigoryevich Krotkov – chief hygienist of the Red Army.....**90

## BRIEF MESSAGES

*Shalaginov S.A., Krestinina L.Yu.*  
**Ural cohort of the population exposed in childhood.....**92

## EXPERT OPINION

*Sakovich V.A.*  
**On the issue of the methodology of quantitative assessment of radiation risk .....**100

## REVIEWS

*Baltrukova T.B.*  
**Review of the monograph «Scientific bases of radiation protection in modern medicine» Volume 1 «Radiation diagnostics».....**104

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS.....**105

## Vol. 13 № 2, 2020

## RESEARCH ARTICLES

*Marchenko T.A., Radin A.I., Razdaivodin A.N.*  
**Retrospective and current state of forest territories of the border areas of the Bryansk region exposed to radioactive contamination.....** 16

*Kuznetsov V.K., Panov A.V., Sanzharova N.I., Isamov N.N., Andreeva N.V., Geshel I.V., Sidorova E.V.*  
**The analysis of radioecological monitoring results in the vicinity of the Kursk Nuclear Power Plant.....**28

*Golikov V.Yu.*  
**Validation of model of external population exposure in Japan after accident on the «Fukushima-1».....**39

*Kryshchuk A.I., Sazykina T.G., Pavlova N.N.*  
**Issues of establishing the permissible discharge levels of <sup>238</sup>U to surface waters taking into account its radiation and toxic effects .....**45

*Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P., Vasilyev A.V., Nazarov E.I., Zhukovsky M.V.*  
**Comparative analysis of radon concentrations in buildings of different energy efficiency classes on example of five Russian cities.....**55

*Ryzhakova N.K., Stavitskaya K.O., Udalov A.A.*  
**A new approach to the problem of assessing the radon hazard of building sites.....**63

*Kaduka M.V., Basalaeva L.N., Bekyasheva T.A., Ivanov S.A., Salazkina N.V., Stupina V.V., Kaduka A.N.*  
<sup>210</sup>Po and <sup>210</sup>Pb content in the certain types of foodstuffs. Optimization of the analytical method.....73

*Sosnina S.F., Yurkin A.M., Okatenko P.V., Rogacheva S.A., Gruzdeva E.A., Sokolnikov M.E.*

**Leukemia risk and rate of radiation dose accumulation. Part 2: Comparative analysis of leukocytic indices and dynamics of peripheral blood values in relation to external gamma-exposure dose.....**86

*Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Kaidanovsky G.N., Ilyin V.A.*  
**Possibilities of comparing the average annual effective doses of medical personnel in Russia and some foreign countries.....**97

*Safronov V.V., Davydov A.A., Vodovatov A.V., Startseva O.I., Biblin A.M., Repin L.V.*  
**Assessment of the medical radiation and non-radiation risks for the patients undergoing the surgical gender reassignment from female to male .....**111

## SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

*Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K.*  
**Proposals on the improvement of the regulation of the natural mineral water based on the indicators of radiation safety .....**121

## BRIEF REPORTS

*Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.*  
**Method for identifying areas of virgin soils using a portable gamma-spectrometer-dosimeter .....**127

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS.....**129

Vol. 13 № 3, 2020

RESEARCH ARTICLES

*Krestinina L.Yu., Silkin S.S., Mikryukova L.D., Epifanova S.B., Akleyev A.V.*  
**Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017** ..... 16

*Zhuntova G.V., Azizova T.V., Bannikova M.V., Zavarukhina T.P.*  
**Incidence trend for colorectal cancer in the cohort of workers exposed to ionizing radiation** ..... 23

*Nilova E.K., Bortnovsky V.N., Tagai S.A., Dudareva N.V., Nikitin A.N.*  
**Assessment of the current levels of <sup>241</sup>Am and <sup>137</sup>Cs in soils and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl NPP exclusion zone (case study: the Bragin district of the Gomel region, Belarus)** ..... 36

*Panov A.V., Trapeznikov A.V., Isamov N.N., Korzhavin A.V., Kuznetsov V.K., Geshel I.V.*  
**Assessment of the impact of the BN-800 reactor operation on the radionuclides content in local foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP** ..... 49

*Marennyy A.M., Kononenko D.V., Trufanova A.E.*  
**Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor radon concentration** ..... 65

*Yakovlev V.A., Bruk G.Ya.*  
**A new approach for the methodology of the assessment of the predicted doses to the public of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl NPP accident** ..... 75

*Sarycheva S.S.*  
**Evaluation of dose parameters defining the probability of deterministic effects in the skin of patients undergoing interventional radiological examinations** ..... 85

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

*Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Saprykin K.A., Vyaltsina N.E., Gaevoy S.V., Kononov V.Yu., Bondar L.V.*  
**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** ..... 96

REVIEWS

*Zvonova I.A.*  
**Internal doses to the public in the Fukushima prefecture from the Fukushima Daiichi NPP accident** ..... 107

*Kalnitsky S.A., Ladanova E.R.*  
**Exposure of the breast, corresponding radiation risks and radiation protection for women, undergoing conventional X-ray examinations** ..... 121

DISCUSSIONS

*Kalinina M.V., Zhukova T.V.*  
**Methodological aspects of the justification of control diagnostic levels of patient exposure in medical X-ray examinations** ..... 129

BRIEF MESSAGES

*Stepkin Yu.I., Chubirko M.I., Kuzmichev M.K., Klepikov O.V., Eprintsev S.A.*  
**Review of radiation incidents in the territory of the Voronezh region** ..... 134

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS** ..... 136

Vol. 13 № 4, 2020

RESEARCH ARTICLES

*Chipiga L.A., Petrova A.E., Vodovatov A.V., Stanzhevsky A.A., Lumpov A.A., Lavreshov D.D., Naurzbaeva L.E., Kushnarenko S.M., Mosunov A.A.*  
**Patient organ and effective dose estimation in radionuclide therapy with <sup>223</sup>Ra-dichloride** ..... 14

*Shalaginov S.A., Akleyev A.V.*  
**Approaches to the assessment of completeness and quality of the registry of exposed population offspring** ..... 24

*Vlasov O.K., Zvonova I.A., Krajewski P., Schukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A.*  
**Reconstruction of radio-ecological model parameters based on the results of monitoring the radiation situation in Mazovia after the Chernobyl accident (based on the «Warsaw» scenario of the IAEA EMRAS project)** .. 32  
*Panfilova V.V., Kolganova O.I., Chibisova O.F., Zhavoronkov L.P.*  
**The influence of learning ability of irradiated and intact rats-parents on higher brain function of their offspring** ... 38

REVIEWS

*Pavlov A.N., Chizh T.V., Snegirev A.S., Sanzharova N.I., Chernyaev A.P., Borshegovskaya P.Yu., Ipatova V.S., Dorn Yu.A.*  
**Technological process of food irradiation and dosimetric support** ..... 49

*Omelchuk V.V.*  
**Radiation-hygienic characteristic of the global radionuclide fallout in the arctic regions of Russia (based on the data of the Institute of Radiation Hygiene after professor P.V. Ramzaev)** ..... 64

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

*Simonova V.G., Bublikova L.I.*  
**Retrospective analysis of the radiation situation in the territory of the Oryol region** ..... 72

RADIATION MEASUREMENTS

*Repin V.S.*  
**Study of the possibility of using an artificial neural network to recognize and assess the contribution of individual radionuclides to the total beta spectrum** ..... 80

*Kiselev S.M., Marennyy A.M., Starinskiy V.G., Belskikh Yu.S., Shlygin V.V., Korenkov I.P., Nefedov N.A., Marennyy M.A.*  
**Quality assessment of indoor radon measurements. Results of the international radon in-field intercomparison study** ..... 91

*Arefyeva D.V., Firsanov V.B., Kuruch D.D., Bryukhov R.E., Tarita V.A.*  
**Gamma scintillation spectrometer calibration using the method of mathematical modeling** ..... 100

BRIEF MESSAGES

*Ramzaev V.P., Bernhardsson Ch., Dvornik A.A., Bakarikova Zh.V., Karlberg O., Vodovatov A.A., Jönsson M., Nekrasov V.A.*  
**Results of international comparison tests on determination of <sup>137</sup>Cs activity concentration in soil samples** ..... 101

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENE PASSPORTIZATION

*Barkovsky A.N., Akhmatdinov Ruslan R., Akhmatdinov Rustam R., Biblin A.M., Bratilova A.A., Zhuravleva V.E., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Sivenkov A.G., Tutelyan O.E., Tsovyanov A.G.*  
**The outcomes of functioning of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens based on the 2019 data** ..... 118

**LIST OF ARTICLES FOR 2020** ..... 120

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS** ..... 124

## Правила для авторов журнала «Радиационная гигиена»

Научно-практический журнал «Радиационная гигиена» был основан в 2008 г. Журнал представляет собой издание научно-теоретической и практической ориентации, направленное на публикацию оригинальных исследований, экспериментальных, теоретических статей, обзоров, кратких сообщений, дискуссионных статей, отчетов о конференциях, рецензий на работы по актуальным вопросам радиационной гигиены, писем в редакцию, хроники событий научной жизни. Тематика журнала включает актуальные вопросы и достижения в области радиационной гигиены и санитарного надзора за радиационной безопасностью.

Полные тексты электронных версий статей представлены на сайтах Научной электронной библиотеки [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru) и официальном сайте журнала «Радиационная гигиена» [www.radhyg.ru](http://www.radhyg.ru).

Журнал «Радиационная гигиена» входит в перечень российских рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Работы для опубликования в журнале должны быть представлены в соответствии с данными требованиями:

1. Материалы, представляемые в статье, не должны быть ранее опубликованными в других печатных изданиях. Авторам следует информировать редакцию журнала о том, что какие-то части этих материалов уже опубликованы и могут рассматриваться как дублирующие. В таких случаях в новой статье должны быть ссылки на предыдущие работы. Копии таких материалов прилагаются к рукописи, чтобы редакция имела возможность принять решение, как поступить в данной ситуации. Не допускается направление статей, которые уже напечатаны в других изданиях или представлены для печати в другие издательства.

2. Редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи.

3. Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать представленные работы. Все статьи, поступающие в редакцию журнала, проходят рецензирование в соответствии с требованиями ВАК.

4. Статья должна сопровождаться официальным направлением учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы. Должно быть экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи. Статья должна быть подписана всеми авторами.

5. Рукописи авторам не возвращаются.

6. **Рукописи, оформленные не в соответствии с правилами, к публикации не допускаются.**

7. Объем обзорных статей не должен превышать 20 страниц машинописного текста. Оригинальных исследований, исторических статей – 15 страниц, исторических и дискуссионных статей – 10, отчетов о конференциях, кратких сообщений и заметок из практики – 5 страниц.

8. Текст статьи печатается на одной стороне листа формата А4 шрифтом Times New Roman кеглем 14, с межстрочным интервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева – 2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

9. Статьи следует присылать в редакцию в электронном виде по адресу: [journal@niirg.ru](mailto:journal@niirg.ru) в формате MS Word с приложением сканированных копий направительного письма и

первой страницы статьи с подписью всех авторов статьи в формате pdf. Печатный экземпляр рукописи, подписанный авторами, и оригинал направительного письма отсылается по почте в адрес редакции.

10. **Титульный лист** должен содержать:

– название статьи (оно должно быть кратким и информативным, не допускается использование сокращений и аббревиатур, а также торговых (коммерческих) названий приборов, медицинской аппаратуры и т.п.);

– фамилию и инициалы автора(ов);

– наименование учреждений, в которых работают авторы с указанием ведомственной принадлежности (Роспотребнадзор, Минздрав России, РАМН и т.п.), город, страна (префиксы учреждений, указывающие на форму собственности, статус организации (ГУ ВПО, ФГБУ, ФБУН и т.д.) не указываются);

– рядом с фамилией автора(ов) и названием учреждения цифрами в верхнем регистре обозначается, в каком учреждении работает каждый из авторов. Если все авторы работают в одном учреждении, указывать место работы каждого автора отдельно не нужно;

– вся информация предоставляется на русском и английском языках. Фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте [www.translit.ru](http://www.translit.ru). **Указывается официально принятый английский вариант наименования организаций!**

11. На отдельном листе указываются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество (полностью) на русском языке и в транслитерации, ученая степень, ученое звание, должность в учреждении/учреждениях, рабочий адрес с почтовым индексом, рабочий телефон и адрес электронной почты всех авторов. Сокращения не допускаются.

12. После титульного листа размещается резюме статьи на русском и английском языках (объемом не менее 250 слов каждая). Резюме к оригинальной научной статье должно иметь следующую структуру: цель, материалы и методы, результаты, заключение. Все пишется сплошным текстом, без выделения абзацев. Для остальных статей (обзор, лекция, дискуссия) резюме должно включать краткое изложение основной концепции статьи, по сути краткое изложение самой статьи. **Резюме не должно содержать аббревиатур и сокращений, кроме общепринятых в мировой научной литературе.** Резюме является независимым от статьи источником информации для размещения в различных научных базах данных. **Обращаем особое внимание на качество английской версии резюме!** Оно будет опубликовано отдельно от основного текста статьи и должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. В конце приводятся **ключевые слова или словосочетания на русском и английском языках** (не более 12) в порядке значимости. **Ключевые слова также не должны содержать аббревиатур и сокращений.**

13. Текст оригинального научного исследования должен состоять из введения и выделяемых заголовками разделов: «Введение», «Цель исследования», «Задачи исследования», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы» или «Заключение», «Литература».

В разделе «Материалы и методы» должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

В разделе «Материалы и методы» должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

14. Если в статье имеется описание наблюдений на человеке, не используйте фамилии, инициалы больных или номера историй болезней, особенно на рисунках или фотографиях. При изложении экспериментов на животных укажите, соответствовало ли содержание и использование лабораторных животных правилам, принятым в учреждении, рекомендациям национального совета по исследованиям, национальным законам.

15. Все радиационные единицы следует приводить в международной системе единиц измерения (СИ) (см.: ГОСТ – 8.417 – 81 ГСИ. Единицы физических величин»; В.И. Иванов В.П. Машкович, Э.М. Центер. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

16. При описании методики исследования можно ограничиться указанием на существо применяемого метода со ссылкой на источник заимствования, в случае модификации – указать, в чем конкретно она заключается. Оригинальный метод должен быть описан полностью.

17. При первом упоминании терминов, неоднократно используемых в статье (однако не в заголовке статьи и не в резюме), необходимо давать их полное наименование и сокращение в скобках, в последующем применять только сокращение, однако их применение должно быть сведено к минимуму. Сокращение проводится по ключевым буквам слов в русском написании, например: источник ионизирующего излучения (ИИИ) и т. д. Тип приборов, установок следует вводить на языке оригинала, в кавычках; с указанием (в скобках) страны-производителя. Например: использовали спектрофотометр «СФ-16» (Россия), спектрофлуориметр фирмы «Hitachi» (Япония). Малоупотребительные и узкоспециальные термины также должны быть расшифрованы.

18. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком и вставляется в текст сразу после ссылки на нее.

19. Иллюстрации должны быть четкие, контрастные. Цифровые версии иллюстраций должны быть сохранены в отдельных файлах в формате Tiff, с разрешением 300 dpi и последовательно пронумерованы. Подписанные подписи должны быть размещены в основном тексте. Перед каждым рисунком, диаграммой или таблицей в тексте обязательно должна быть ссылка. В подписях к микрофотографиям, электронным микрофотографиям обязательно следует указывать метод окраски и обозначать масштабный отрезок. Диаграммы должны быть представлены в исходных файлах. Рисунки (диаграммы, графики) должны иметь подпись всех осей с указанием единиц измерения СИ. Легенда выносится за пределы рисунка.

**20. Необходимо оформлять подписи к рисункам и таблицам, тексты внутри них на русском и на английском языках.**

21. **Библиографические ссылки** в тексте должны даваться цифрами в квадратных скобках в соответствии со списком литературы в конце статьи.

**Пример: В тексте:** Общий список справочников по терминологии, охватывающий время не позднее середины XX века, даёт работа библиографа И.М. Кауфмана [59].

Если авторы не указаны, в отсылке указывают название документа, при необходимости указывают год издания, страницы.

Сведения в отсылке разделяют точкой и запятой.

**Нумеруйте ссылки последовательно, в порядке их первого упоминания в тексте (не по алфавиту)!** Для оригинальных научных статей – не менее 15–20 источников, для лекций и обзоров – не более 60 источников, для других статей – не более 15 источников.

22. К статье прилагаются на отдельном листе **два списка литературы**.

23. **В первом списке литературы (Литература)** библиографическое описание литературных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

**Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.**

24. **В списке литературы не следует указывать постановления, законы, санитарные нормы и правила, другие нормативно-методические документы.** Указания на них следует размещать в сносках или внутритекстовых ссылках. Сноски и внутритекстовые ссылки следует представить и на английском языке, написав после английского описания язык текста (In Russ.).

**Примеры внутритекстовых ссылок:**

.....согласно Норм радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) [перевод на английский язык (In Russ.)]. Или .....согласно ГОСТ Р 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

**Подстрочные ссылки (сноски):**

<sup>1</sup> СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

<sup>1</sup> МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 “Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations”. Moscow, Rosпотребнадзор, 2011, 40 p. (In Russ.)]

**ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК**

**Литература**

Если имеется 3-4 автора, то указываются все. Если от 5 и больше – первые три автора, затем ставится «и др.».

**Книги и брошюры:**

Сергеев И.В., Смирнова Т.П., Исаков М.Н. Лучевая диагностика в России. СПб.: НИИРГ, 2007. 123 с.

Jenkins P.F. Making sense of the chest xray: a handson guide. New York: Oxford University Press; 2005. 194 p.

Iverson C., Flanagan A., Fontanarosa P.B. et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; 1998. 660 p.

**Многотомные издания или на часть книги:**

Пивинский Ю.Е. Общие вопросы технологии // Неформальные огнеупоры. М., 2003. Т. 1, кн. 1. С. 430-447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Основы общей патофизиологии // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. СПб.: ЭЛБИ, 1999. Ч. 1., гл. 2. С. 124–169.

Riffenburgh R.H. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447–86.

Ettinger S.J., Feldman E.C. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders; 2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems; p. 553–98.

**Статьи из журнала, сборника:**

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, №1. С. 46-52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 859–863.

**Из сборника конференций (тезисы):**

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007. М., 2007. С. 50-51.

**Ссылки на Интернет-ресурсы:**

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия/ URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 16.06.2019)

**Ссылки на статьи с DOI:**

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. REJR. 2018. Т.8, №3. С. 60-73. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

**Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:**

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Радиационная гигиена, 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

**Патенты:**

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

**Из газеты:**

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332) С. 5.

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332). 5 сент.

**Диссертация и автореферат диссертации:**

Фенухин В.И. Этнополитические конфликты в современной России: на примере Северо-Кавказского региона: дис.... канд. полит. наук: защищена 22.01.02; утв. 15.07.02. М., 2002. 215 с.

Кадука М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2001. 23 с.

**25. Второй список литературы (References)** полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется в соответствии с Ванкуверским стилем (Vancouver Style). При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов должны быть транслитерированы. Название работы переводится на английский язык.

Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

**Примеры:**

Статья 1-6 авторов

Petitti DB, Crooks VC, Buckwalter JG, Chiu V. Blood pressure levels before dementia. *Arch Neurol*. 2005 Jan;62(1):112-6.

Статья 7 и более авторов (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»)

Hallal AH, Amortegui JD, Jeroukhimov IM, Casillas J, Schulman CI, Manning RJ, et al. Magnetic resonance cholangiopancreatography accurately detects common bile duct stones in resolving gallstone pancreatitis. *J Am Coll Surg*. 2005 Jun;200(6): 869-75.

**Статья в электронном журнале**

Errami M, Garner H. A tale of two citations. *Nature*. 2008;451(7177): 397–399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. *Chronicle of Higher Education*. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

**Статья в электронном журнале с DOI:**

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanigan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. *Am J Sports Med* [Internet]. 2012 Dec;40(12): 2872-8. Available from: <http://ajs.sagepub.com/content/40/12/2872> DOI: 10.1177/0363546512458223 [Accessed 19 Feb 2013]

**Книга (печатная)**

Carlson BM. Human embryology and developmental biology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2009. 541 p.

**Книга (электронная)**

Shreeve DF. Reactive attachment disorder: a case-based approach [Internet]. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <http://ezproxy.lib.monash.edu.au/login?url=http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-1647-00363546512458223> [Accessed 2 Nov 2012]

**Отчет официальной организации (государственный, ведомственный, пр.).**

Rowe IL, Carson NE. Medical manpower in Victoria. East Bentleigh (AU): Monash University, Department of Community Practice; 1981. 35 p. Report No.: 4.

Leatherwood S. Whales, dolphins, and porpoises of the western North Atlantic. U.S. Dept. of Commerce. Report number: 63, 2001.

**Веб-страница**

Diabetes Australia. Diabetes globally [Internet]. Canberra ACT: Diabetes Australia; Available from: <http://www.diabetesaustralia.com.au/en/Understanding-Diabetes/DiabetesGlobally/> [Accessed Nov 5 2012].

European Space Agency. Rosetta: rendezvous with a comet. Available from: <http://rosetta.esa.int> [Accessed 15 June 2015].

**Из сборника конференций (тезисы)**

Wittke M. Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rock. In: Van Cotthem A, Charlier R, Thimus J-F, Tshibangu J-P. (eds.) Eurock 2006: multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics:

Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9–12 May 2006, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211–216.

**Стандарт**

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. *Design of steel structures. General rules. Structural fire design*. London: BSI; 2005.

**Методические рекомендации/руководство**

National Institute for Health and Care Excellence (NICE), Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-1837390683589> [Accessed 27 May 2017].

**Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.**

**Все статьи печатаются в журнале бесплатно.**

Статьи направляются по адресу: 197101, г. СанктПетербург, ул. Мира, д. 8, Федеральное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева». Редакция журнала «Радиационная гигиена» и по email: [journal@niirg.ru](mailto:journal@niirg.ru).

Справки по телефону: (812) 2334283 и (812) 2335016 (редакция журнала «Радиационная гигиена»).

Факс: (812) 2335363, 2334283.